

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia de Energia

**Caracterização energética da macaúba  
(*Acrocomia aculeata*)**

Autora: Laura Vieira Maia de Sousa  
Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF  
2020





Laura Vieira Maia de Sousa

## **Caracterização energética da macaúba (*Acrocomia aculeata*)**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Coorientador: Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Paula Meyer Soares

Brasília, DF

2020

---

Laura Vieira Maia de Sousa

Caracterização energética da macaúba (*Acrocomia aculeata*)/ Laura Vieira  
Maia de Sousa. – Brasília, DF, 2020-  
72 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2020.

1. Biomassa. 2. Energia. I. Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa. II. Universidade  
de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Caracterização energética da macaúba  
(*Acrocomia aculeata*)

CDU 02:141:005.6

---

Laura Vieira Maia de Sousa

## **Caracterização energética da macaúba (*Acrocomia aculeata*)**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 10 de dezembro de 2020:

---

**Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa**  
Orientador

---

**Prof<sup>ª</sup>.Dr<sup>ª</sup>. Maria Vitória Ferrari**  
Convidado 1

---

**Dr<sup>ª</sup>. Simone Palma Favaro**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2020



*Dedico este trabalho aos meus avós, Cleyde e Edmundo, que  
me inspiram e guiam todos os dias, mesmo que na erraticidade.*





# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família pelo apoio e amor incondicionais frente às minhas escolhas e caminhos percorridos, e a percorrer.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Vitória Ferrari, que me apresentou à Engenharia de Energia, inicialmente pelas aulas inspiradoras e, posteriormente, pela confiança em me inserir nos projetos que, hoje, fundamentam este Trabalho de Conclusão de Curso e a minha carreira acadêmica.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Paula Meyer Soares, que se tornou uma grande amiga e mentora diante às questões acadêmicas e de vida.

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Fábio Cordeiro de Lisboa, pela confiança e apoio na orientação acadêmica, e cuja caminhada admiro profundamente. Os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao companheiro e melhor amigo Túlio, pelo suporte nas atividades de pesquisa e nessa incrível e complexa caminhada que é a vida.

Aos meus padrinhos, Maria Helena e Hiram, que estiveram presentes desde o início desta etapa, apoiando e aconselhando.

À Aline Fagundes, que esteve presente no início deste processo e compartilhou conselhos, livros, apoio e amizade.

Aos meus amigos, que apoiam e fazem do trabalho e estudo diários momentos mais alegres.



*‘Quando o servidor está pronto, o serviço aparece!’  
(André Luiz)*



# Resumo

Os índices atuais de emissão de GEE's, principalmente vindos do próprio setor energético, preocupa as novas gerações. As consequências repassam no aumento da temperatura da superfície média global, em mudanças nos sistemas naturais, na elevação do nível do mar e, até mesmo, em perdas em biodiversidade. Dessa forma, a biomassa se apresenta como fonte energética alternativa aos usos de combustíveis fósseis atuais, fechando, assim, o ciclo do carbono. O presente trabalho caracteriza energeticamente o endocarpo da macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart) por meio de Análise Lignocelulósica, utilizando metodologia empregada nas Unidades do Sistema Embrapa; Termogravimetria (TG), com o objetivo de avaliar o comportamento da amostra a determinadas temperaturas; Análise de Poder Calorífico Superior (PCS), determinada pela NBR 8.633/1984 e o emprego de pirólise lenta a fim de se obter o carvão da macaúba para realizar a Análise Imediata do Carvão Vegetal (NBR 8112). Foram utilizados endocarpos dos frutos cedidos pela Embrapa Cerrados, cujos tratamentos no cultivo das palmeiras foi com irrigação (CI) e adubação (CA), com origens de São Paulo e Distrito Federal. Os resultados para PCS dos frutos não apresentaram variação com os valores de literatura, sendo 21,0413 MJ/kg para frutos CI/DF e 20,9409 CI/SP. Os endocarpos CA/DF apresentaram 20,8996 MJ/kg e CA/SP média de 20,8657 MJ/kg. A Análise TGA apresentou uma temperatura de degradação da celulose, hemicelulose e lignina de 380°C, sendo este maior que o da casca de cupuaçu, 288,9°C, e tucumã, 328,7°C. O valor de lignina insolúvel do endocarpo da macaúba foi de 32,755%. O rendimento da pirólise lenta de patamar super longo de 430°C e rampa de aquecimento de 2°C min<sup>-1</sup> foi de 30,54%, também condizente com a literatura.

**Palavras-chaves:** macaúba. biomassa. análise imediata. pirólise. bioenergia.



# Abstract

The current GHG emission rates, mainly from the energy sector itself, are of concern to new generations. The consequences go through the increase in the temperature of the global average surface, changes in natural systems, rising sea levels and even losses in biodiversity. Thus, biomass presents itself as an alternative energy source to the use of current fossil fuels, thus closing the carbon cycle. The present work energetically characterizes the endocarp of macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart) by means of Lignocellulosic Analysis, using methodology employed in the Embrapa System Units; Thermogravimetry (TG), with the objective of evaluating the behavior of the sample at certain temperatures; Gross Calorific Value Analysis, determined by NBR 8.633 / 1984 and the use of slow pyrolysis in order to obtain macaúba coal to perform the Immediate Charcoal Analysis (NBR 8112). Fruit endocarps provided by Embrapa Cerrados were used, whose soil treatments were cultivated with irrigation (CI) and fertilization (CA), with origins in São Paulo and the Federal District. The results for PCS of fruits provided by Embrapa did not vary with the values in the literature, being 21.0413 MJ / kg for fruits CI / DF and 20.9409 CI / SP. CA / DF endocarps showed 20.8996 MJ / kg and mean CA / SP of 20.8657 MJ / kg. The TGA Analysis showed a degradation temperature of cellulose, hemicellulose and lignin of 380°C, which is higher than that of cupuaçu bark, 288.9°C, and tucumã, 328.7°C. The value of insoluble lignin in the endocarp of macauba was 32.755 %. The yield of the super long slow pyrolysis of 430°C and heating ramp of 2°C min<sup>-1</sup> was 30.54 %, also in line with the literature.

**Key-words:** macauba. biomass. immediate analysis. pyrolysis. bioenergy.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – <i>Ocorrência da macaúba no Brasil.</i> . . . . .	32
Figura 2 – <i>Acrocomia aculeata</i> . . . . .	32
Figura 3 – Classificação da biomassa. . . . .	34
Figura 4 – <i>Estrutura da biomassa lignocelulósica.</i> . . . .	36
Figura 5 – Análises térmicas. . . . .	38
Figura 6 – Carbonização e os seus produtos. . . . .	39
Figura 7 – Metodologia para caracterização dos frutos. . . . .	41
Figura 8 – SDT Q600 - <i>TA Instruments.</i> . . . .	51
Figura 9 – Balança de alta precisão com cadinhos de platina posicionados. . . . .	51
Figura 10 – Esquema da retorta. . . . .	52
Figura 11 – Sistema de retorta localizado no LPF. . . . .	53
Figura 12 – Vedação da retorta com pasta de cobre e fechamento do equipamento. . . . .	53
Figura 13 – Curvas DTG e TG para degradação do endocarpo da macaúba. . . . .	58
Figura 14 – <i>Ficha de coleta e rastreabilidade de frutos nas redondezas do Ulysses</i> <i>Guimarães- frente.</i> . . . . .	71
Figura 15 – <i>Ficha de coleta e rastreabilidade de frutos nas redondezas do Ulysses</i> <i>Guimarães- verso.</i> . . . . .	72



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Média de produtividade de óleo por oleaginosas. . . . .	33
Tabela 2 – Formulação empírica dos compostos químicos da biomassa. . . . .	35
Tabela 3 – PCS de variadas biomassas em base seca. . . . .	37
Tabela 4 – Disposição das palmeiras do DF e SP CA e CI na Embrapa Cerrados. .	42
Tabela 5 – Dados de origem dos frutos para cada tratamento. . . . .	42
Tabela 6 – Dados da Análise lignocelulósica do endocarpo da macaúba. *Média dos dados. . . . .	57
Tabela 7 – Temperaturas de degradação da curva DTG. . . . .	58
Tabela 8 – Dados referentes ao PCS do endocarpo da macaúba com diferentes tratamentos: CI e CA. . . . .	59
Tabela 9 – Valor obtidos na Análise Imediata do Carvão e da macaúba in natura.	60
Tabela 10 – Comparativo entre análise imediata da macaúba e caroço do açaí. *Mé- dia ponderada dos PCS's analisados. . . . .	60



# Lista de abreviaturas e siglas

NBR	Norma Brasileira
IEA	Agência Internacional de Energia
MLA	Mais Luz para a Amazônia
TFEC	Consumo Total de Energia Final
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
GEE	Gases Efeito Estufa
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
TGA	Termogravimetria
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
TA	Análise Térmica
ICTAC	International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry
FTIR	Transformada de Fourier por Infravermelho
DTA	Análise Térmica Diferencial
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
TMA	Análise Termomecânica
DIL	Análise Dilatométrica
DMA	Análise Dinamomecânica
LFA	TPP -Laser Light Flash Analysis
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LPF	Laboratório de Produtos Florestais

CI	Com irrigação
CA	Com adubação
SA	Sem adubação
SI	Sem irrigação
ASTM	American Society for Testing and Materials

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>25</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>26</b>
1.2.1	Objetivos específicos	26
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Biomassa no Brasil e no mundo</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Macaúba</b>	<b>31</b>
<b>2.3</b>	<b>Caracterização energética da biomassa</b>	<b>33</b>
<b>2.4</b>	<b>Estrutura da biomassa</b>	<b>34</b>
<b>2.5</b>	<b>Propriedades físico-químicas da biomassa</b>	<b>35</b>
2.5.1	Análise Lignocelulósica	36
2.5.2	Poder Calorífico Superior	37
2.5.3	Análise Termogravimétrica - TG	37
<b>2.6</b>	<b>Caracterização da biomassa carbonizada: pirólise</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Origem dos frutos</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Preparação dos frutos</b>	<b>43</b>
<b>3.3</b>	<b>Metodologia para caracterização energética</b>	<b>43</b>
3.3.1	Análise Lignocelulósica	43
3.3.1.1	Teor de umidade	44
3.3.1.2	Teor de cinzas	44
3.3.1.3	Teor de extrativos	45
3.3.1.4	Teor de lignina	47
3.3.1.5	Teor de holocelulose	48
3.3.1.6	Teor de alfacelulose	49
3.3.2	Análise Termogravimétrica - TGA	50
3.3.3	Análise de Poder Calorífico Superior do Endocarpo	51
3.3.4	Pirólise	52
3.3.5	Análise Imediata do Carvão	53
3.3.5.1	Umidade	54
3.3.5.2	Teor de voláteis	54
3.3.5.3	Teor de cinzas	54
3.3.5.4	Carbono fixo	55

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	57
4.1	Análise Lignocelulósica . . . . .	57
4.2	Análise Termogravimétrica - TGA . . . . .	57
4.3	Análise de Poder Calorífico Superior do Endocarpo . . . . .	59
4.4	Pirólise e Análise Imediata do Carvão - ABNT NBR 8112 . . . . .	60
5	CONCLUSÃO . . . . .	61
	REFERÊNCIAS . . . . .	63
	APÊNDICES	69
	APÊNDICE A – PRIMEIRO APÊNDICE . . . . .	71



# 1 Introdução

A dependência de fontes energéticas de origem fóssil tem sido uma das principais influências do clima global desde meados do século XX. As consequências deste fato são o aumento da temperatura da superfície média global – mais de 1,5°C -, além de profundas mudanças nos sistemas naturais, como secas, inundações, elevação do nível do mar e até mesmo perda de biodiversidade (ALLEN et al., 2018). E para que este cenário se modifique, será necessário que o sistema global de energia reduza as suas emissões (IEA, 2020a).

De acordo com IEA (2020a), os maiores índices atuais de emissão de CO<sub>2</sub> são de responsabilidade do setor energético, configurando a necessidade de mudanças para fontes mais limpas. Essa tendência fomenta diálogos entre as lideranças internacionais referentes ao equilíbrio entre mudanças climáticas e segurança energética, buscando alternativas renováveis para compor suas matrizes energéticas (GOUVÊA, 2019).

Ao final do ano de 2018, mais de 26% da geração de eletricidade global foi oriunda de fontes renováveis. Atualmente, um terço da capacidade global de energia instalada é representado por estas fontes, uma consequência de iniciativas globais e locais e diminuição dos custos destas novas tecnologias (MURDOCK et al., 2019). Estas iniciativas se dão por meio de mudanças nos marcos regulatórios dos países, bem como incorporação de políticas *feed-in* - referente aos Recursos Energéticos Distribuídos (RED)- e redução de subsídios ineficientes para o setor (REN21, 2018).

Os RED's têm papel importante para disseminação e fomento de inovações tecnológicas do setor energético e ao acesso à energia de famílias em economias mundiais emergentes. Em 2017, a quantidade de famílias sem acesso à energia elétrica no mundo caiu para menos de 1 bilhão (IEA, 2020b). No Brasil, o Mais Luz para a Amazônia (MLA), programa lançado no ano de 2020 pelo Decreto nº 10.221 de 5 de fevereiro de 2020, terá por objetivo promover o acesso a energia elétrica a estas populações localizadas em áreas remotas nos estados da Amazônia Legal, cujo atendimento deverá ser feito utilizando, estritamente, fontes renováveis (BRASIL, 2020a).

Em 2018, houve um aumento de 2,3% da demanda global energética (IEA, 2019). Este fato deu-se pelo crescimento econômico global de 3,7%, onde apenas os EUA, China e Índia foram responsáveis por 70% do aumento da demanda energética mundial. Isso significa um aumento nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em 1,7%.

No ano de 2017, o Consumo Total de Energia Final (TFEC) foi representado em 18,1%, sendo 10,6% vindos de energias renováveis. Dentro da parcela de renováveis, a energia térmica representou 4,2%, 3,6% de hidrelétrica e 2% de outras fontes – solar, eólica

e biomassa. Ainda assim, os combustíveis fósseis representaram 79,7% do TFEC neste mesmo ano (REN21, 2018). Os dados em 2018 variam pouco, como o aumento para 11% na participação de energias renováveis modernas e 2,1% por outras fontes (MACDONALD; EYRE, 2018).

Segundo a EPE (2020), a matriz elétrica brasileira possui origem majoritariamente renovável. Essas fontes têm participação em 83% da oferta interna de eletricidade no país, de acordo com o ano base 2019, tendo a fonte hidráulica representado 64,9%, eólica 8,6%, solar 1% e biomassa 8,4%. Ainda, de acordo com o documento, a retração da oferta do carvão mineral contribuiu para um aumento percentual na renovabilidade da matriz energética.

Em 2006, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) lançou o Plano Nacional de Agroenergia, que fomenta a pesquisa em palmeiras oleaginosas para uma maior produção de biodiesel no país (BHERING, 2009). Com isso, a macaúba, que possui alto rendimento de óleo da polpa, se apresentou- e se apresenta- como fonte energética promissora. Atualmente, o Programa Mais Luz para Amazônia apresenta potencial para fomentar o uso dessa biomassa, tanto nos estados da Amazônia Legal, quanto para o restante do país.

No Brasil, a espécie *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart., popularmente conhecida por macaúba, tem sua ocorrência desde os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, passando por Minas Gerais, região Centro-Oeste, Nordeste, sul do Pará até o Paraná (AQUINO et al., 2008a). Por apresentar altos níveis de rendimento de óleo, a exploração da matéria-prima macaúba, também denominada como um Produto Florestal Não Madeirável (PFNM) (LORENZI, 2006), tornou-se alternativa valiosa para produção de biodiesel e de cultivo para as populações rurais que dependem de subprodutos de produtos florestais para a sua subsistência.

As vantagens da macaúba vão além da produção de óleo. Os coprodutos do seu processamento possuem grande potencial energético, podendo resultar em menores custos de produção no processo de beneficiamento. O fruto da macaúba é formado por uma casca (epicarpo), polpa (mesocarpo), endocarpo e amêndoa. Dentre estes constituintes, o endocarpo pode ser considerado um subproduto da cadeia de produção de biodiesel e convertido em carvão vegetal para fins energéticos (EVARISTO et al., 2016a).

Nessa perspectiva, o presente trabalho propõe-se a caracterizar e analisar energeticamente o endocarpo da macaúba a fim de que este resíduo, rico em carbono, possa ser utilizado como fonte renovável para a geração de energia elétrica. As análises a serem realizadas englobam Análise Lignocelulósica, Análise Imediata do Carvão (NBR 8112) (ABNT, 1986), Análise Termogravimétrica e de Poder Calorífico Superior.

Além disso, apresenta um breve referencial teórico sobre o cenário da biomassa

no Brasil e no mundo, avalia individualmente a macaúba, que é o objeto de estudo do presente trabalho, e explana sobre as análises realizadas para caracterização energética da biomassa.

## 1.1 Justificativa

A transição energética no setor elétrico se apresenta necessária para mitigação de emissão de GEE's e suas consequências. Essa transição é fomentada e liderada por países desenvolvidos, como a Alemanha, onde são implementadas políticas para ampliação do uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica (LOSEKANN; TAVARES, 2019).

No que diz respeito às políticas energéticas, estas buscam, sempre, a manutenção da segurança e do abastecimento energético. Além disso, promovem o acesso desse serviço essencial a preços razoáveis e sua produção a partir de meios ambientalmente sustentáveis. Segundo Tavares (2019), algumas estratégias são levadas em consideração para que estas políticas atinjam o seu objetivo de promover uma transição de baixo carbono: expandir fontes de baixo carbono; manter fontes já existentes com baixa emissão; substituir fontes com altas emissões de carbono e promover o consumo eficiente.

Sabendo disso, e levando em consideração que o Brasil é signatário no Acordo de Paris com metas para reduzir 37% suas emissões de GEE's até 2025 e 43% até o ano de 2030, a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil determinou uma maior participação de biocombustíveis, i.e biodiesel, etanol e biocombustíveis de segunda geração, aumentando em 18% até 2030; expandir a participação de energias renováveis não hidráulicas na matriz energética, resultando em até 33% até o mesmo ano de 2030; além de medidas de eficiência no setor industrial e de transporte (LOSEKANN; TAVARES, 2019).

Em 2006, foi instituído o Plano Nacional de Agroenergia (2006), cujo objetivo foi atingir novos parâmetros para rendimento de óleo em espécies oleaginosas a partir do fomento em pesquisas na área. A obtenção do óleo, segundo o autor, poderia ser feita com culturas tradicionais que já dominam a prática de cultivo destes frutos, aumentando os níveis à época de 500 a 700 kg de óleo/ha. Então, seria possível desenvolver um mercado mais competitivo para a produção de biodiesel e, ao mesmo tempo, garantir a segurança de fornecimento energético nacional (BHERING, 2009). Dentre as oleaginosas estudadas, a macaúba apareceu como fonte de grande potencial dada a sua elevada produção de óleo por hectare.

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017 (BRASIL, 2020b), foi implementada em 2017 com o objetivo de contribuir com as metas propostas no Acordo de Paris, bem como a garantia da segurança de abastecimento de combustíveis, agregar valor à biomassa nacional, promover o

desenvolvimento econômico e social, entre outros.

Em 2020, a instituição do Programa Nacional do Acesso e Uso da Energia Elétrica na Amazônia Legal - Mais Luz para a Amazônia busca atender comunidades em regiões remotas que ainda não tiveram acesso ao serviço de energia elétrica, ou que tenham acesso apenas por fontes não renováveis. A Amazônia Legal é composta por nove estados que pertencem à bacia Amazônica, sendo eles Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e parte do Maranhão.

Ainda hoje, segundo [Cardoso et al. \(2020\)](#), a cultura extrativista da macaúba é predominante. Nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Ceará é possível localizar centros extrativistas do fruto, onde os seus subprodutos – sabão, óleos, torta para alimentação animal - servem de renda para estas comunidades locais. A partir do óleo obtido pelo mesocarpo do fruto, são obtidos biocombustíveis, biomateriais, cosméticos. A amêndoa fornece óleo fino para o setor de cosmético, além de bioquerosene, sabão. E, como resíduo, o endocarpo é direcionado para geração de energia, carvão e biomateriais ([CARDOSO et al., 2020](#)).

Dessa forma, avaliando o cenário mundial e nacional de políticas de promoção ao uso de fontes renováveis, responsabilidade ambiental e acesso ao serviço essencial de energia elétrica, a macaúba apresenta-se como importante objeto de estudo para geração de energia elétrica, haja vista sua extensa distribuição geográfica e possibilidade de cultivo nas diferentes regiões do país.

## 1.2 Objetivo geral

Caracterizar energeticamente o endocarpo da macaúba a fim de se obter resultados que representem o seu potencial energético.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver referencial teórico voltado à biomassa e sua caracterização energética.
- Apresentar dados de Poder Calorífico Superior do endocarpo da macaúba de palmeiras originárias de SP e DF, cedidas pela Embrapa Cerrados, com diferentes tratamentos.
- Realizar Análise Imediata do Carvão ABNT NBR 8112 e do fruto da macaúba in natura.
- Realizar análises Lignocelulósica, de Termogravimetria – TGA do endocarpo.
- Determinar os pontos de degradação térmica – TGA- dos componentes da biomassa – lignina, celulose e hemicelulose.

- Avaliar o potencial energético da macaúba.



## 2 Referencial teórico

### 2.1 Biomassa no Brasil e no mundo

A biomassa, como fonte energética renovável, se apresenta como alternativa aos principais apelos mundiais para descarbonização. A sua definição pode ser dada como qualquer resíduo sólido de origem vegetal, animal e urbano ([ARBEX et al., 2004](#)), podendo ser utilizada como fonte energética, abarcando rotas tecnológicas diversas de conversão energética, como rotas termoquímicas ou bioquímicas ([LISBOA, 2016](#)). Pode ser caracterizada, segundo [Cortez, Lora e Gomez \(2008\)](#), como uma fonte energética não poluente, sendo proveniente da conversão química da energia da luz solar. Isto significa que, de maneira indireta, é o aproveitamento da luz solar incidente absorvida pelas plantas.

A geração de energia a partir dessa fonte renovável é reconhecida por contribuir para mitigação das mudanças climáticas. Esse fato ocorre devido ao ciclo de carbono fechado na geração de energia, dado que este ciclo é feito a partir de trocas compensadoras ([INTERATIVA, 2019](#)). Além disso, segundo [Bellote et al. \(2018\)](#), o cultivo energético da macaúba – considerado aquele que tem por finalidade a produção de energia – é uma alternativa para minimizar impactos.

A biomassa de origem florestal teve papel importante no contexto energético nacional. A lenha, por exemplo, representou mais da metade da energia consumida pelo país na década de 50. Atualmente, estes números caíram para apenas 8% e os principais motivos se devem às tecnologias atuais, diminuição do custo de derivados de petróleo e aumento da produção de energia ao longo dos anos. No entanto, são várias as vantagens que o país possui no que tange ao uso da biomassa como fonte energética.

Ainda segundo [Bellote et al. \(2018\)](#), os fatores geográficos contribuem para que o país seja referência internacional no manejo de florestas plantadas. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) representa as principais pesquisas na área como, por exemplo, na diversificação e manutenção de espécies a partir de bancos de germoplasma. Em 2005, com a instituição do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) ([BRASIL, 2005](#)), houve a necessidade de ampliar as opções de oleaginosas para espécies que produzissem mais por área plantada. Dessa forma, a Embrapa iniciou os estudos de espécies nativas e perenes, sendo a macaúba uma delas.

Os resíduos de atividades agrícolas podem ser considerados importantes no que tange à produção de energia a partir da biomassa. Conceitualmente, são considerados resíduos materiais que não possuem aproveitamento direto na cadeia de beneficiamento

de alguma matéria-prima. Isso significa que o uso destes materiais para fins energéticos podem contribuir para a auto-suficiência energética das comunidades locais, fazendo com que a cadeia de beneficiamento de suas matérias-primas seja mais eficiente, além de gerarem uma energia limpa.

Essa bioenergia, energia derivada da biomassa, de acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), pode ser classificada em tradicional ou moderna. A forma tradicional é a utilizada para queima direta em dispositivos simples e a moderna refere-se à utilização de tecnologias de conversão, como, por exemplo, as de combustão direta num ciclo a vapor e a de gaseificação. A gaseificação, por sua vez, é caracterizada pelo processo de conversão da biomassa num gás de síntese por oxidação e a altas temperaturas (CORTEZ, 1997).

No Brasil, de acordo com IRENA (2020a), a capacidade instalada em bioenergia no ano de 2019, levando em consideração biogás e biocombustíveis sólidos e líquidos, foi de 14.980 MW. Em 2018, esse valor foi de 14.777 MW, ou seja, uma variação de 10.203 MW. Para a energia gerada, os valores foram de 54.498 GWh em 2018 e 52.993 GWh, em 2017. No mundo, ainda de acordo com a agência, a capacidade instalada foi de 109.470 MW em 2019 e 104.625 MW em 2018, e para energia gerada esses valores foram de 460.404 GWh em 2018 e 438.242 GWh em 2017. Isso significa que o Brasil representou, em 2019, 13,68% da capacidade instalada em bioenergia no mundo e 11,83% de bioenergia gerada em 2018.

A Alemanha, como exemplo prático, apresenta a questão ambiental como tema de grande importância, visto o seu perfil tradicional na pauta de sustentabilidade. Atualmente, ainda mais acentuados dados os riscos climáticos, a política energética e ambiental alemã movimenta, mobiliza e influencia as relações entre a sociedade civil e o país. Este fato se reflete nos posicionamentos avançados tomados pelo país quanto a política energética.

Desde os anos 70, sendo motivados pelos movimentos ambientais da época, bem como pela necessidade de democratizar a geração e garantir a sua segurança energética, a Alemanha iniciou o *Energiewende*, a sua transição energética. Desde então, o setor elétrico do país tem desenvolvido o seu marco legal, visando sempre a sustentabilidade do setor (RAUSCHMAYER, 2018).

O mundo está passando por uma inevitável transição energética e a bioenergia irá representar um papel importante na geração de energias renováveis. Até o ano de 2050, segundo IRENA (2020b), a energia elétrica gerada atualmente mais que dobrará. A estimativa é de que esse consumo chegaria a marca de 55.000 TWh. E dos 49% considerados TFEC no ano de 2050, 86% dessa eletricidade poderá ser de origem renovável, com a biomassa gerando 7% dessa energia. A capacidade instalada para bioenergia teria de aumentar seis vezes do que representava em 2017 para suprir a demanda de 2050: 685



GW.

Dessa forma, é possível avaliar alguns papéis importantes desempenhados pela eletricidade a partir da bioenergia. Os custos de geração podem ser mais baixos que outras fontes quando a biomassa em questão for mais barata; auxilia na curva de demanda onde a participação de fontes solar e eólica variam; utiliza o mecanismo de *Bio-Energy with Carbon Capture and Storage* (BECCS), ou seja, fecha o ciclo do carbono (BROWN; FEUVRE, 2017) ((IRENA), 2019).

## 2.2 Macaúba

A macaúba, também popularmente conhecida como bocaiúva, macaíba, macaiúva, mocajá, coco-de-espinho, entre outros vários nomes dependendo de sua região de ocorrência, é uma palmeira com grande distribuição geográfica, estendendo-se do México a Argentina, também com maior representação nas Antilhas, Costa Rica, Paraguai e no Brasil (CETEC, 1983). Segundo Morcote-Rios e Bernal (2001), o uso dessa palmeira data da pré-história, aproximadamente 9.000 anos a.C., e desde então a sua utilização tem sido extrativista (FILHO; COLOMBO; BERTON, 2012).

No Brasil, dentre a ocorrência de palmeiras, é a que possui a maior dispersão de maciços nativos nos biomas Cerrado e Pantanal (GRANDE; SUL, 2012). Como já citado anteriormente, possui ocorrência de grupamentos em Minas Gerais, Ceará, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (SILVA, 2009), bem como em São Paulo e Rio de Janeiro, todo o Centro-Oeste, Nordeste e Norte do país, atingindo a América Central (AQUINO et al., 2008b)(figura 1). Esta palmeira, segundo Carvalho, Souza e Machado (2011), não ocorre em regiões com climas de geada, nem em territórios permanentemente alagados, bem como áreas montanhosas e clima excessivamente árido. A estimativa feita por DURÃES (2008) aponta que há, aproximadamente, 11,5 milhões de hectares de macaubais ainda nativos, com uma densidade de plantas de 200 por ha. Estes dados podem estar sendo reduzidos devido ao desmatamentos e uso do solo para agricultura.

As palmeiras dessa espécie são robustas, com estipe de aproximadamente 30 a 40 cm de diâmetro e atingindo até 15 metros de altura (CETEC, 1983). Em seus troncos há presença de espinhos bastante escuros, em particular na região dos nós (GRANDE; SUL, 2012). O início de sua produtividade, segundo Lisboa (2016), é aos 4 anos de idade, estabilizando em 7 a 8 anos, com patamares de produção próximos de 1500 a 5000 kg de óleo por ha ao ano (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008). Quanto aos frutos da macaúba, estes possuem conformação esférica, com diâmetro variando entre 2,5 a 5,0 cm, e ficam dispostos em cachos. Estes frutos são compostos por 20% de casca, 40% de polpa, 33% de endocarpo e 7% de amêndoa, estando os teores de óleo em maior parte na polpa - podendo ser superior a 70% (VENANCIO et al., 2016). A colheita destes frutos é realizada entre

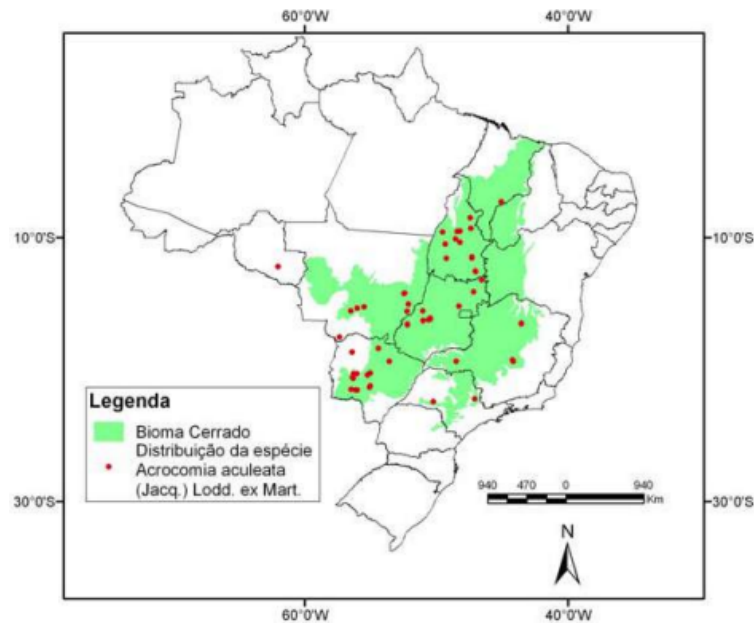


Figura 1 – Ocorrência da macaúba no Brasil.

Fonte: (RATTER; BRIDGEWATER; RIBEIRO, 2003).

os meses de setembro a janeiro e apenas quando estes estão caídos no chão (FARIA, 2010)(CETEC, 1983)(NUCCI, 2011).

A figura 2 apresenta a configuração da macaúba. O epicarpo é a parte amarelada-escuro, que quando maduro o fruto, rompe-se facilmente. O mesocarpo é a parte mais amarelada do fruto, onde se encontra a polpa, que é fibrosa e comestível. O endocarpo, parte mais escura, densa e rígida do fruto, é bastante aderido à polpa e é rico em carbono. A amêndoa, localizada no interior do fruto, também é comestível e possui alto valor agregado (GRANDE; SUL, 2012).



Figura 2 – *Acrocomia aculeata*

Fonte: (BRASIL, 2018)

Ao comparar a macaúba com outras oleaginosas na tabela 1, Cortez, Lora e Gomez (2008) chama a atenção para a maior produtividade do dendê *Elaeis guineensis* que, frente às outras palmeiras, é a que mais produz óleo por hectare. Isto se deve, segundo Moura et

al. (2007), ao seu melhoramento genético que já perdura há décadas, o que potencializa positivamente os cenários futuros da macaúba quanto a sua produtividade.

Tabela 1 – Média de produtividade de óleo por oleaginosas.

Oleaginosas	Litros de óleo por hectare
Babaçu	1500 a 2000
Dendê/palma	3000 a 6000
Pinhão manso	3000 a 3600
Pequi	2600 a 3200
Macaúba	1500 a 5000
Soja	480 a 650
Girassol	500 a 1000
Mamona	500 a 900
Amendoim	800 a 1850
Algodão	250 a 500
Colza/canola	650 a 1000

Fonte: (NEGRETTI et al., 2011) (COSTA; OLIVEIRA; PIRES, 2015) (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008)

Evaristo et al. (2016b) caracterizou a macaúba e obteve resultados para a densidade do endocarpo em  $1,007 \text{ kg m}^{-3}$ , significando, segundo Lisboa (2016), uma densidade maior que a madeira de eucalipto e maior que o do endocarpo do babaçu. Os teores de cinza foram 0,97%, de lignina, 36,6%, de extrativos, 10,8%, e 52,6% de hemicelulose. O autor também apresenta que os valores de produtividade do fruto chegam a  $30 \text{ ton ha}^{-1}$ , representando  $10 \text{ ton ha}^{-1}$  de endocarpo.

## 2.3 Caracterização energética da biomassa

A biomassa pode ser definida como material orgânico de origem vegetal proveniente de reações entre o gás carbônico, água e luz solar, i.e. é obtido por meio da fotossíntese, armazenando a energia do sol nas ligações químicas de todos os seus componentes (VI-EIRA, 2012). Essa energia química pode ser obtida a partir da quebra dos laços adjacentes entre as moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio. (MCKENDRY, 2002).

Portanto, valendo-se de processos de conversão físicos, químicos e biológicos, esta energia presente na biomassa poderá ser convertida (HAYKIRI-AÇMA, 2003) apud (VI-EIRA, 2012). Os produtos combustíveis obtidos a partir destes processos podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Segundo Werther et al. (2000), materiais com alto potencial energético obtidos pela biomassa podem ser classificados como resíduos agrícolas, i.e. palha, bagaço de cana, casca de café, casca de arroz, entre outros, e resíduos florestais, como madeira, serragem e casca. A figura 3 apresenta estas variadas fontes da biomassa.

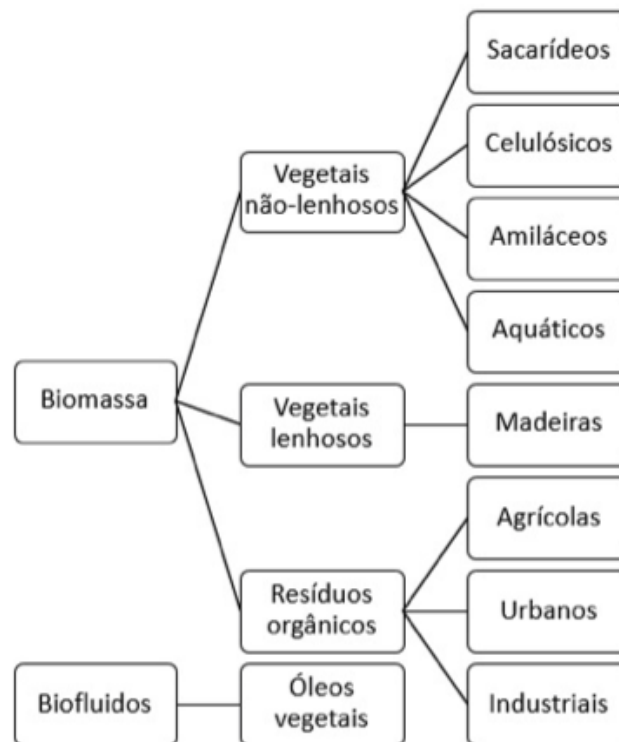


Figura 3 – Classificação da biomassa.

Fonte: (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008)

Diante o exposto, e visando adquirir um aproveitamento eficiente destes materiais sólidos, é preciso que se estude as principais propriedades físico-geométricas, químicas, térmicas e aerodinâmicas desta biomassa a fim de avaliar o comportamento destes materiais durante o processo da conversão físico e energético (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008). Estas propriedades só poderão ser conhecidas por meio de análises em ambientes controlados, mediante amparo de normas e metodologias consolidadas.

## 2.4 Estrutura da biomassa

A biomassa pode ser considerada um hidrocarboneto com átomos de oxigênio em sua composição, fazendo com que seja um combustível menos poluente (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008). Os principais componentes da biomassa lignocelulósica são a celulose, hemicelulose e a lignina, variando os teores de cada componente. Estes componentes são carboidratos – cerca de 50% a 60% - como celulose e hemicelulose e 35% de lignina (FERREIRA, 2019). Sua formulação é dada na tabela 2 seguir.

A celulose é considerada a macromolécula mais abundante no planeta, numa produção estimada de 1012 t ano. Sua estrutura é definida por um macropolímero a partir

Tabela 2 – Formulação empírica dos compostos químicos da biomassa.

Hemicelulose	$C_6H_{10}O_5$
Celulose	$C_5H_8O_4$
Lignina	$C_9H_{10}(OCH_3)_{0,9-1,7}$

Fonte: (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008)

de cadeias lineares de moléculas de glicose. Muitas são as áreas que se utilizam da celulose, como a indústria moveleira, da construção civil e no setor de combustíveis sólidos. As indústrias têxtil, alimentícia, farmacêutica e de manufatura de papeis se utilizam da celulose após extração industrial (MORAIS, 2010).

A holocelulose, que será determinada adiante, é a combinação de carboidratos presentes no material vegetal. Sabendo o teor deste material na amostra vegetal e o teor de alfacelulose, que será brevemente explanado no tópico seguinte, e realizando um cálculo de diferença entre os dois, é possível obter o valor de hemicelulose contido no material vegetal. A hemicelulose, molécula de heteropolissacarídeos, faz parte da composição estrutural de todo material vegetal, assim como a celulose e lignina. Suas moléculas são planas e localiza-se entre a lignina, parte externa do material, e da celulose, parte interna, ou seja, auxilia nas ligações da celulose com as da lignina (AHMAD et al., 2007). Quanto aos seus usos, é a partir de seus carboidratos que o etanol de segunda geração pode ser formado, bem como espessantes, adesivos, emulsificantes (TAHERZADEH; KARIMI, 2007); (KAMM; KAMM, 2004).

A lignina tem como função auxiliar no suporte estrutural, impermeabilizar e colaborar com a estrutura vegetal contra ataques microbianos (PÉREZ et al., 2002). É uma substância aromática que está presente em maioria nos vegetais e na biosfera (LI; YUAN; YANG, 2009) e é uma molécula caracterizada por sua complexidade estrutural. Ainda hoje, segundo Hatfield e Fukushima (2005), após 50 anos de pesquisa na área de determinação da lignina, ainda não foram aprovadas metodologias que não apresentem ambiguidades e que sejam definidas como definitivas. Dessa forma, são vários os métodos que podem ser utilizados, como, por exemplo, o método de Klason, que é o emprego de ácido sulfúrico diluído a fim de dissolver carboidratos. Permanece, então, apenas a lignina insolúvel.

A figura 4 apresenta os polímeros que constituem os materiais lignocelulósicos.

## 2.5 Propriedades físico-químicas da biomassa

O tópico a seguir visa discorrer sobre algumas das principais propriedades físico-químicas e térmicas que ocorrem na conversão energética e física da biomassa (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008) que, segundo Lisboa (2016), acaba sendo o primeiro passo para a

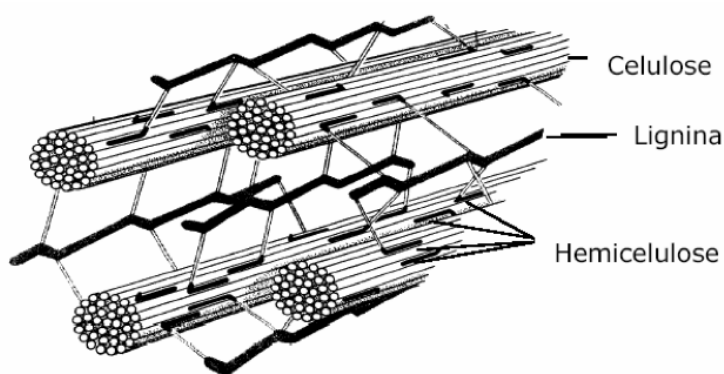


Figura 4 – *Estrutura da biomassa lignocelulósica.*

Fonte: (JR.; COUTO; ANNA, 2008)

quantificação energética deste potencial combustível no dimensionamento de um sistema de potência, tanto por combustão quanto por gaseificação.

As análises a serem discutidas a frente serão Análise Lignocelulósica, Análise de Poder Calorífico Superior, Análise Termogravimétrica e a Análise Imediata do Carvão, onde será possível representar a biomassa quanto aos seus teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo da biomassa (MORAIS, 2010).

### 2.5.1 Análise Lignocelulósica

Segundo Morais (2010), os materiais lignocelulósicos ainda são subutilizados, mesmo sendo renováveis e estando presentes em diversas matérias-primas. Como já citado anteriormente, podem ser obtidos a partir de resíduos agroflorestais e urbanos a custos relativamente baixos (TAHERZADEH; KARIMI, 2007). Compostos aromáticos leves, combustíveis sólidos sem enxofre são obtidos da lignina; a hemicelulose é insumo para produção de gomas vegetais, adesivos, emulsificantes, estabilizantes e precursores de polímeros. A celulose, por sua vez, responsável pela glicose e todos os seus derivados, como etanol, ácidos e solventes orgânicos (KAMM; KAMM, 2004), bem como extração de nanocristais para preparo de compósitos (HUBBE et al., 2008).

Portanto, baseando-se nas diversas aplicações destes compostos, é necessária uma metodologia para determinação dos seus respectivos teores na biomassa em questão. Esta é definida, então, como Análise Lignocelulósica e compõe a análise elementar do material. As outras análises a serem realizadas serão Análise de Poder Calorífico Superior, Análise Termogravimétrica e a Análise Imediata do Carvão, onde será possível representar a biomassa quanto aos seus teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo da biomassa (MORAIS, 2010).

## 2.5.2 Poder Calorífico Superior

Igualmente, a determinação do Poder Calorífico da biomassa torna-se relevante quanto a futuros projetos de sistemas e diversificação de combustíveis. O Poder Calorífico, segundo [Quirino \(2020\)](#), é dado pela quantidade de calor liberada pela combustão completa do material. A energia térmica liberada na combustão é medida por unidade de massa - megajoules por quilograma. Dessa forma, esta propriedade depende da biomassa, sua composição e o seu grau de umidade.

O Poder Calorífico é classificado em Superior e Inferior. As definições se diferem quanto à quantidade máxima de energia liberada levando em conta, ou não, a umidade contida na amostra, ou seja, a energia necessária para evaporar a umidade contida no material. Neste caso, o PCS é caracterizado como a quantidade máxima de energia obtida na combustão, ou seja, calor liberado. O Poder Calorífico Inferior (PCI) já aponta a quantidade de energia sem considerar o calor latente de condensação de umidade dos produtos de combustão ([CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008](#)). O presente trabalho irá avaliar o PCS do endocarpo da macaúba utilizando bomba calorimétrica adiabática a partir da norma NBR 8.633/1984 ([ABNT, 1984](#)).

A tabela 3 apresenta o PCS de algumas biomassas em base seca (sem umidade) apresentados por [Jenkins \(1990\)](#). Dentre elas, a macaúba se destaca pelo alto PCS avaliado por [Lisboa \(2016\)](#).

Tabela 3 – PCS de variadas biomassas em base seca.

Tipo de Biomassa	PCS [MJ/kg]
Macaúba	24,26
Resíduos sólidos urbanos	19,87
Caroço de açaí	19,16
Casca de coco	19,04
Sabugo de milho	18,77
Fibra de coco	18,67
Ramas de algodão	18,26
Bagaço de cana	17,33
Casca de arroz	16,14

Fonte: Adaptado de ([NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008](#)),([JENKINS, 1990](#)) e ([LISBOA, 2016](#)).

## 2.5.3 Análise Termogravimétrica - TG

A Análise Térmica (TA) é utilizada para investigar o comportamento de uma amostra em função da temperatura e do tempo ([HATAKEYAMA; QUINN, 1999](#)). Esta abrange um aglomerado de técnicas, cujas quais monitoram propriedades físicas de al-



gum material enquanto este é submetido a um ambiente com temperaturas pré-definidas controladas por computador.

Brown (2001) apresenta na figura 5 o grupo das principais técnicas termoanalíticas utilizadas. Estas abrangem a Termogravimetria (TG), a Análise Térmica Diferencial (DTA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a Análise Termomecânica (TMA), Análise Dilatométrica (DIL), Análise Dinamomecânica (DMA) e TPP -Laser Light Flash Analysis (LFA).

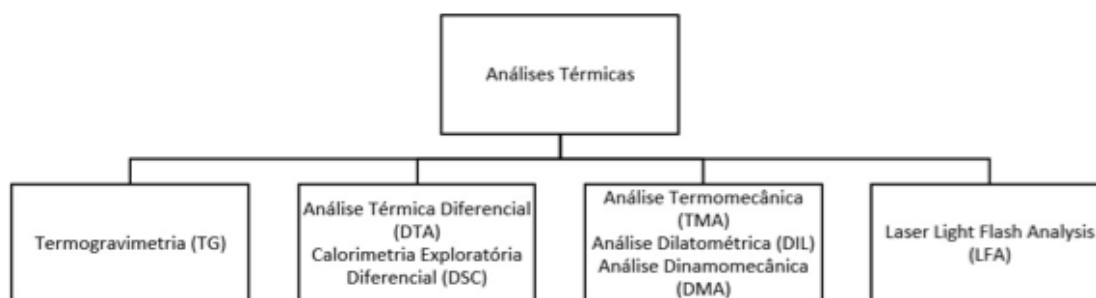


Figura 5 – Análises térmicas.

Fonte: (BROWN, 2001).

A análise de TG avalia as mudanças de massa da amostra, no caso a biomassa, diante à interação com a atmosfera, vaporização e decomposição. Essas mudanças de massa são medidas com o auxílio de uma balança termométrica, que é a combinação de uma microbalança eletrônica, um programador de temperatura e o computador para controle. Este último permite que a amostra seja aquecida, resfriada e pesada simultaneamente, concomitante ao armazenamento dos dados.

Segundo Hatakeyama e Quinn (1999), as análises de DTA e DSC avaliam os processos físicos e químicos envolvendo a variação de energia da amostra. A TMA e DMA, respectivamente, monitora as mudanças nas dimensões, deformações, propriedades viscoelásticas e transições. Por conseguinte, o TPP-LFA avalia as propriedades termofísicas, realiza o cálculo da difusividade e condutividade térmica.

A utilização da TA abrange muitas áreas, como a de polímeros, alimentos, catálise, engenharia civil, farmacêutica, petroquímica e, a do presente trabalho, orgânica, e suas vantagens são muitas, como o uso de pequenas quantidades e não necessidade de preparo da amostra, variedade de resultados num único gráfico e sua aplicação nas diversas áreas de pesquisa (HATAKEYAMA; QUINN, 1999)(BROWN, 2001).

Dessa forma, o presente trabalho irá se utilizar da TA, na modalidade de TGA-DSC de uma amostra do endocarpo da macaúba, a fim de se avaliar o comportamento deste material em função de temperaturas pré-determinadas.



## 2.6 Caracterização da biomassa carbonizada: pirólise

A pirólise é definida como o processo de degradação térmica dos materiais com parcial ou total ausência do agente oxidante (LISBOA, 2016). Este processo de transformação da biomassa em carvão vegetal ocorre a temperaturas baixas, por volta dos 400°C a 800°C, quando comparadas às temperaturas de outros processos como a gaseificação que ocorrem a partir dos 800°C e atingem os 1100°C (BRIDGWATER; BRIDGE, 1991).

Os produtos obtidos do processo de pirólise são: gás, licor pirolenhoso e o carvão vegetal. Estes produtos podem ser obtidos em maiores ou menores proporções, dependendo apenas da metodologia e dos parâmetros utilizados no processo. Um exemplo a ser utilizado, segundo Lisboa (2016), é a aplicação da pirólise rápida para maior obtenção de produtos líquidos, enquanto que a carbonização produz maiores porções de carvão sólido. A figura 6 apresenta os produtos da carbonização de maneira mais clara.

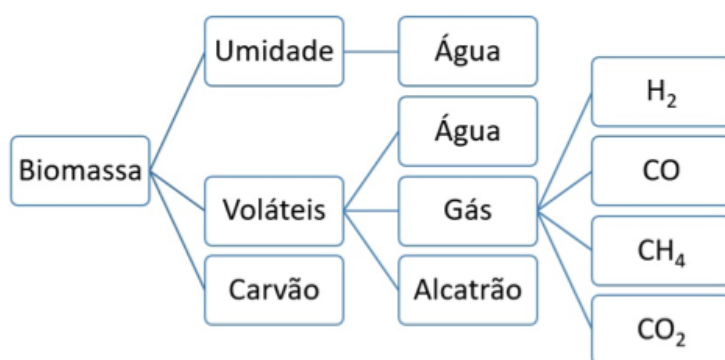


Figura 6 – Carbonização e os seus produtos.

Fonte: Adaptado de (LISBOA, 2016).

O processo de carbonização da biomassa é composto por várias etapas produzindo variados compostos químicos. Lisboa (2016) apresenta as frações mássicas destes produtos obtidos a partir da pirólise, que seguem em 33% de carvão, 35,5% de licor pirolenhoso, 6,5% de alcatrão insolúvel e 25% de gases. As quatro etapas onde estes produtos são formados, definidas pelo autor, apresentam-se a seguir:

- A produção de vapor d'água, CO<sub>2</sub>, ácido fórmico e ácido acético ocorrem até os 200°C. É o processo de secagem, tomado por reações endotérmicas.
- A segunda etapa ocorre entre as temperaturas de 200°C e 280°C. Há emissão de CO, além dos produtos da etapa anterior, e vapor d'água – esta última é reduzida. Ocorre aqui reações endotérmicas e a degradação da hemicelulose.

- A terceira etapa é caracterizada pela degradação da celulose e carbonização da biomassa por reações exotérmicas. Os produtos são os gases combustíveis, alcatrão, CO e  $CH_4$ . As temperaturas atingem as marcas de 280°C a 400°C.
- A concentração de carbono no carvão e a redução dos gases é obtida na última etapa, a partir dos 400°C até os 470°C.

Portanto, diante da obtenção do carvão por meio da pirólise, é possível que este seja analisado por meio da Análise Imediata do Carvão Vegetal. Esta análise é normatizada pela forma NBR 8112/1986 ([ABNT, 1986](#)) e consiste em avaliar, também, a qualidade da biomassa para seus fins energéticos. São avaliados teores de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo.

### 3 Materiais e métodos

A metodologia utilizada para a realização da caracterização energética do endocarpo seguiu os passos relacionados na figura 7 a seguir.

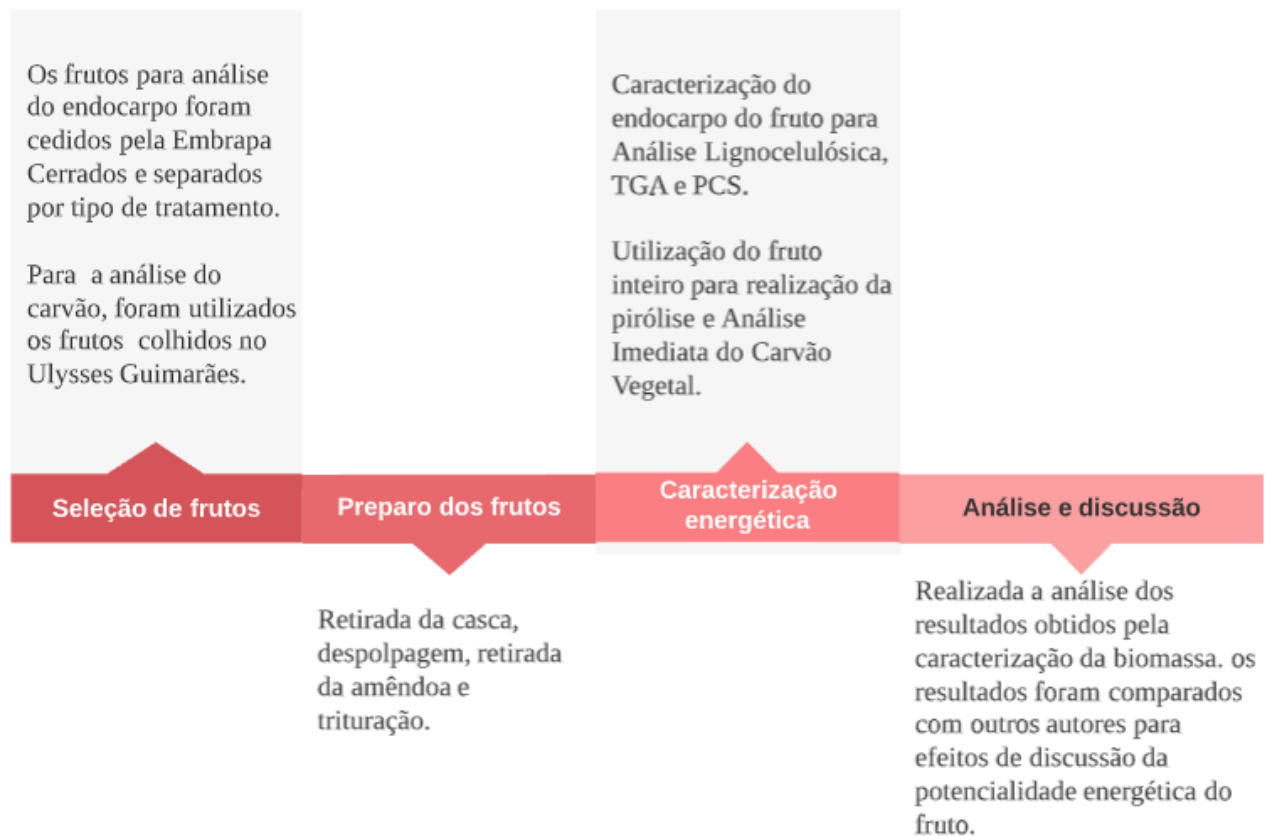


Figura 7 – Metodologia para caracterização dos frutos.

Fonte: Da autora, 2020.

Os frutos foram cedidos pela Embrapa Cerrados, que gentilmente acolheu a presente pesquisa. As análises foram realizadas no Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, localizado nas dependências do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), em Brasília.

#### 3.1 Origem dos frutos

Os frutos utilizados para caracterização do endocarpo foram cedidos pela Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina - DF.

As populações de maciços macaúba avaliadas pela Embrapa são provenientes das regiões do Estado de Minas Gerais, Goiás, Pará, São Paulo (SP) e Distrito Federal (DF)

(CONCEIÇÃO, 2013). O objetivo da pesquisa, então realizada pela Empresa, é o de avaliar a produção potencial de óleo destes maciços, a fim de que sejam selecionados genótipos promissores.

Outro fator a ser levado em consideração na pesquisa da Embrapa foi o tratamento utilizado em cada acesso de cada região. Os acessos foram cultivados utilizando tratamentos em solo diferentes, como irrigação e adubação, bem como acessos sem nenhum dos dois tratamentos. Ou seja, dos 32 acessos, 16 são de SP e 16 do DF. Destes, 4 de SP foram tratados com irrigação (CI) e 4 sem irrigação (SI), bem como 4 com adubação (CA) e 4 sem adubação (SA). O mesmo ocorrendo com os acessos do DF, sendo 4 acessos CI e 4 SI e 4 CA e 4 SA. A tabela 4 abaixo apresenta a disposição dos acessos no plantio localizado na Embrapa Cerrados, em Planaltina, Brasília – DF.

Tabela 4 – Disposição das palmeiras do DF e SP CA e CI na Embrapa Cerrados.

Irrigação	AcDF/SI-PARC.336	AcSP/CI-PARCE.334	AcSP/SI-PARCE.334	AcDF/CI-PARCE.333
	AcSP/SI-PARC.332	AcSP/CI-PARCE.324	AcDF/SI-PARCE.330	AcSP/CI-PARCE.329
	AcDF/SI-PARCE.328	AcDF/CI-PARCE.327	AcSP/SI-PARCE.326	AcSP/CI-PARCE.325
	AcDF/SI-PARCE.324	AcSP/CI-PARCE.323	AcSP/SI-PARCE.322	AcDF/CI-PARCE.321
Adubação	AcDF/SA-PARC.352	AcSP/CA-PARC.351	AcSP/SA-PARC.350	AcDF/CA-PARC.349
	AcSP/SA-PARC.348	AcSP/CA-PARC.347	AcDF/SA-PARC.346	AcDF/SA-PARC.345
	AcDF/SA-PARC.344	AcDF/CA-PARC.343	AcSP/SA-PARC.342	AcSP/CA-PARC.341
	AcDF/SA-PARC.340	AcSP/CA-PARC.339	AcSP/SA-PARC.338	AcDF/CA-PARC.337

Fonte: Do autor, 2020.

De modo a se obter uma maior rastreabilidade dos frutos, foram anotados dados como o tipo da planta e data da colheita. A tabela 5 abaixo apresenta as relações de origem dos acessos, numeração e quantidade de frutos de cada parcela de tratamento CI e SI, respectivamente. Devido ao fato de que não há quantidade de frutos iguais para cada parcela, foi necessário definir uma quantidade de frutos média para análise aleatória dos mesmos.

Tabela 5 – Dados de origem dos frutos para cada tratamento.

Irrigação					
Tratamento	Origem	Parcelas	Frutos parcela	Máximo para análise	Total para análise
CI	DF	327-333-329-321	17-20-20-20	10	40
	SP	335-331-323-325	20-20-20-20	10	40
SI	DF	336-328-324-330	10-19-20-22	10	40
	SP	332-334-326-322	20-12-20-19	10	40
Adubação					
CA	DF	343-349-345-337	10-24-20-20	10	40
	SP	351-347-339-341	20-10-20-10	10	40
SA	DF	352-344-340-346	19-18-14-20	10	40
	SP	348-350-342-338	19-20-20-16	10	40

Fonte: Do autor, 2020.

A caracterização energética da macaúba incluiu a análise do seu carvão e fruto in natura. Neste caso, a Análise Imediata do Carvão (NBR 8112) (ABNT, 1986) e Aná-

lise Imediata do Fruto In Natura (adaptação LPF) foram realizadas utilizando frutos colhidos nas redondezas do Centro de Convenções Ulysses Guimarães. Para garantir a rastreabilidade destes frutos, foram elaboradas fichas de caracterização da planta, local, data, registro da planta, que estão anexas ao final do presente trabalho. As análises Lignocelulósica, Termogravimetria (TGA) e Poder Calorífico Superior (PCS) foram feitas com os frutos cedidos pela Embrapa Cerrados.

## 3.2 Preparação dos frutos

A preparação dos endocarpos para a sua caracterização foi realizada a fim de que se pudesse obter apenas o endocarpo.

A polpa da macaúba, bastante fibrosa e oleosa, exige que seja seca antes de ser retirada. Os frutos, já sem casca, foram separados em bandejas de alumínio e colocados na estufa Marconi com ventilação forçada a 105°C por cinco dias. Após o período, os frutos foram despulpados no ralador de aço inox. Finalizada a retirada das polpas, utilizou-se uma marreta para quebrar os frutos e retirar a amêndoa de seu interior.

Os endocarpos foram, então, triturados no triturador Ika Werke mod. M20, classificados no agitador de peneiras eletromagnético BerFel modelo 01.12. Apenas os produtos entre o topo de 60 mesh e fundo de 100 mesh foram utilizados para as análises do Poder Calorífico Superior do endocarpo in natura, de acordo com a norma ASTM D 2015-77 ([ASTM, 1975](#)).

## 3.3 Metodologia para caracterização energética

As metodologias utilizadas para realização das Análises Lignocelulósica, TGA, PCS e Análise Imediata seguiram, respectivamente, os Procedimentos para Análise Lignocelulósica empregada por Unidades do Sistema Embrapa ([MORAIS, 2010](#)), análise experimental de TGA com parâmetros setados previamente, ASTM *Standard Method for Gross Calorific Value of Solid Fuel by Adiabatic Bomb Calorimeter*; D 2015-77 ([ASTM, 1975](#)) e ABNT NBR Carvão Vegetal- Análise Imediata 8112/1986 ([ABNT, 1986](#)).

### 3.3.1 Análise Lignocelulósica

A metodologia utilizada para realização da Análise Lignocelulósica baseou-se no documento Procedimentos para Análise Lignocelulósica utilizado por Unidades do Sistema Embrapa ([MORAIS, 2010](#)). Esta análise foi realizada na Faculdade do Gama (FGA) da Universidade de Brasília (UnB).

### 3.3.1.1 Teor de umidade

Após a preparação da amostra, tópico 3.3, foi colocada na estufa para que a água contida evapore. Então, foram medidas as massas das amostras antes e após este processo para que este teor fosse determinado. A metodologia abrange uso de fornos elétricos (TAPPI, 2009)(THIEX, 2002), ou até mesmo fornos de micro-ondas (SOUZA; NOGUEIRA; RASSINI, 2002).

De acordo com TAPPI (2002c), a diferença de massa entre duas pesagens deve ser de 0,1%, ou seja, num cenário onde são pesados 2000 g, esta diferença entre amostras deve ser de 0,0020 g.

Para a determinação do teor de umidade do endocarpo da macaúba, foi necessário proceder primeiramente com a secagem da vidraria, que consistiu em cadinhos de porcelana. Estes foram lavados, secos na estufa e colocados no dessecador com sílica gel por 30 minutos, a fim de que se garantisse seu resfriamento sem a absorção de umidade. Posteriormente a esse processo, os cadinhos foram pesados com balança de precisão de 0,1 mg.

Após o processo de secagem da vidraria, foram colocados 2,000 g de endocarpo triturado no cadinho de alumina, sendo anotado sempre o maior número possível de algarismos apresentados na balança. O conjunto material-recipiente, então, foi levado à estufa pré-programada para permanência a  $105 \pm 2$  °C. Retirado o conjunto após um período de 24 horas, este foi posto no dessecador e deixado por 30 minutos. Após este tempo, foram anotados os pesos na balança.

O cálculo realizado, na equação 3.1, para determinar a massa da amostra seca (AS) e o teor de umidade (TU%) levou em conta a massa do recipiente (MR), a massa da amostra úmida (MAU), a massa do conjunto recipiente + amostra úmida (MRAU) e a massa do recipiente + amostra seca (MRAS).

$$\frac{(MRAU - MRAS) \times 100\%}{MAU} = TU\% \quad (3.1)$$

Onde,

- MRAU - Massa do conjunto recipiente + amostra úmida.
- MRAS - Massa do recipiente + amostra seca.
- MAU - Massa da amostra úmida.

### 3.3.1.2 Teor de cinzas

As cinzas podem ser caracterizadas como os minerais presentes na biomassa, bem como os materiais residuais utilizados no seu preparo. Também são consideradas cinzas os

resíduos nos quais ela teve algum contato, como contaminações, sendo estas identificadas a partir da determinação dos teores (RAO; XIANG, 2009)(NADA, a)(TAPPI, 2002a). É possível afirmar que nas cinzas estejam presentes os minerais sódio, potássio, cálcio, magnésio, ferro, zinco, entre outros, residuais da combustão.

Há várias metodologias para determinação do teor de cinzas e a utilizada no estudo, apresentada por [Moraes \(2010\)](#), foi a de materiais vegetais.

Na metodologia utilizada para obtenção do teor de cinzas, foram utilizados 1,5 g de material triturado. Os cadinhos de alumina utilizados para análise foram previamente calcinados em mufla a 600°C por 30 minutos e, posteriormente, colocados num dessecador para resfriamento. Após este processo, o conjunto material-recipiente foi colocado na mufla numa rampa de aquecimento de aproximadamente 9,6 °C/min com patamar de 600°C em 60 minutos. A temperatura do patamar permaneceu por 3 horas e, findo este tempo, decaiu para 200°C em 1 hora. O conjunto foi retirado e posicionado no dessecador por 30 minutos.

Após o processo de medição da massa do recipiente (MR), massa da amostra (MA) e da massa do conjunto-recipiente/amostra calcinada (MRAC), foi possível definir o teor de cinzas totais do material (TC)

$$\frac{(MRAC - MR)}{MA} \times 100\% = TC\% \quad (3.2)$$

Onde,

- MR - Massa do recipiente.
- MA - Massa da amostra.
- MRAC - Massa do conjunto recipiente/amostra calcinada.

### 3.3.1.3 Teor de extrativos

Extrativos são compostos que não fazem parte dos constituintes estruturais dos materiais lignocelulósicos, como açúcares, polissacarídeos – solúveis em água- e sais; ácidos e ésteres graxos, álcoois de cadeia longa, ceras, resinas, esteroides ([PINO et al., 2007](#))([SILVÉRIO et al., 2006](#))([TAPPI, 1997](#)).

Estes extrativos variam seu teor qualitativa e quantitativamente quando comparados com diferentes materiais. Para alguns materiais oriundos da madeira, este teor é na faixa de 2% a 15%, a depender da espécie, representando classes amplas de moléculas ([MIYAUCHI; MORI; ITO, 2005](#))([ZHANG et al., 2007](#)). Por este motivo, há dificuldade no uso de solventes orgânicos, não sendo possível a extração de todas as substâncias, e mesmo quando esta ocorre, a remoção ocorre em diferentes combinações ([TAPPI, 1997](#)).

Mesmo que seja recomendado pela norma TAPPI a utilização de Soxhlet para extração por diclorometano ou utilização da mistura 1:2 (v/v) de etanol: estes dois últimos são voláteis e inflamáveis (TAPPI, 1997). Por isso foi utilizada acetona 70% - 7:3 (v/v) de acetona: água (TAYLOR et al., 2007).

A determinação dos extrativos para o presente trabalho foi definida de acordo pelos Procedimentos para Análise Lignocelulósica empregada por Unidades do Sistema Embrapa. Foi utilizado Soxhlet e 4,0000 g de amostra triturada do endocarpo da macaúba. No balão de vidro, são adicionados 150 mL de solvente acetona e conectado o conjunto ao extrator para, posteriormente, junto à manta aquecedora, serem conectados ao condensador. A extração, então, foi configurada para acontecer nas 5 horas seguintes. Os refluxos são ajustados para não passarem de 24 e ocorrerem no período de 5 horas. Findo este período, o solvente foi recuperado até que seu volume final no balão atingisse 25 mL e os extrativos fossem movidos para um recipiente limpo e seco, com massa já aferida. Este conjunto recipiente + extrativos foi colocado na estufa programa por 1 hora a  $105 \pm 20^\circ\text{C}$ . Ao final, o conjunto foi retirado da estufa, colocado no dessecador por 30 minutos e retirado para pesagem. O cálculo para determinação do teor de extrativos foi dado por:

$$\frac{(MRE - MRRS)}{MA} \times 100\% = TE\% \quad (3.3)$$

Onde,

- MRE - Massa do conjunto recipiente + extrativos.
- MRRS - Massa do conjunto recipiente + resíduo de solvente.
- MA - Massa da amostra.

O valor obtido na equação 3.3 refere-se à amostra seca. Ou seja, para correção deste dado e utilizando o valor de TU%, dado pela equação 1, tem-se:

$$\frac{TE\% \times (100 - TU\%)}{100} = TE\%_{corrigido} \quad (3.4)$$

Onde,

- TU% - Teor de umidade.
- TE% - Teor de extrativos.
- TE% corrigido - Teor de extrativos corrigido.



#### 3.3.1.4 Teor de lignina

O método utilizado no presente trabalho foi o método de Klason, ditado pela norma TAPPI (2002b), utilizando ácido sulfúrico diluído. Foram utilizados 1,0000 g de amostra triturada, seca e sem extrativos. Ao almofariz, foram adicionados 17 mL de ácido sulfúrico 72% (m/m) a 10°C e a amostra. Após movimentar o conjunto com o pistilo ao ponto de não haver partículas visíveis, a mistura foi deixada em espera por 24 horas. Findo este período, adicionaram-se 306 mL de água destilada no almofariz e transportados todo o conteúdo do almofariz para o balão de 1000 mL. O balão, então, foi colocado numa manta aquecedora, conectado ao condensador, onde o material foi mantido por 4 horas em refluxo. Terminadas as 4 horas, o conjunto foi desligado e deixado o balão atingir a temperatura ambiente.

O aparato de filtração foi preparado enquanto o conjunto balão + amostra foram resfriados. Foi utilizado um funil sinterizado, com massa aferida, lavado, seco em estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ , com abertura de poro de  $10 \mu$  a  $16 \mu$ , com capacidade para 50 mL, e este foi colocado sobre um kitassato de 1000 mL. Uma bomba de vácuo foi conectada ao conjunto e ligada assim que o conteúdo do balão foi sendo despejado cuidadosamente no funil. Este processo foi repetido com água destilada até que o filtrado tenha o pH da água e para que não se perdesse lignina insolúvel no processo. Para medir o pH, foi utilizado um papel indicador de pH.

O conjunto funil + lignina foi levado para estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  por 3 horas e, ao final deste período, o conjunto foi colocado no dessecador por 30 minutos e depois levado à balança analítica para aferição da massa. O teor de lignina insolúvel foi dado pela equação 3.5 a seguir.

$$\frac{MFL - MF}{MA} \times 100\% - TC\% = TLI\% \quad (3.5)$$

Onde,

- MFL - Massa do funil + massa da lignina.
- MF - Massa do funil seco.
- MA - Massa da amostra.
- TC% - Teor de cinzas.
- TLI% - Teor de lignina insolúvel.

O valor de TLI% obtido não conta a umidade nem os extrativos. Portanto, foi calculada a equação 3.6 a seguir:

$$\frac{TLI\%[100 - (TE\% + TY\%)]}{100} = TLI\%_{corrigido} \quad (3.6)$$

Onde,

- TLI% - Teor de lignina insolúvel.
- TE% - Teor de extrativos.
- TU% - Teor de umidade.
- TLI%<sub>corrigido</sub> - Teor de lignina insolúvel corrigido.

### 3.3.1.5 Teor de holocelulose

Inicialmente, os funis de vidro sinterizados, com abertura de 40  $\mu$  a 100  $\mu$  e capacidade para 150 mL, foram lavados e secos por, ao menos, 2 horas na estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ . Num Erlenmeyer de 500 mL, foram adicionados 3,000 g de amostra, já seca e sem extrativos, e 120 mL de água destilada. Para a manutenção da temperatura a  $70 \pm 2^\circ\text{C}$ , é feito um banho-maria com glicerina num béquer.

Ao conteúdo do Erlenmeyer, foram adicionados 2,5 g de clorito de sódio ( $\text{NaClO}_2$ ), 1 mL de ácido acético glacial de pureza 99,85% e a barra magnética para garantir que o conteúdo seja agitado constantemente. Após o período de 1 hora com o Erlenmeyer em banho-maria sendo aquecido, foram adicionados mais 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético, onde o aquecimento foi de mais 1 hora. Findo este tempo, mais 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético são adicionados para serem aquecidos por mais 3 horas.

Após as 5 horas de aquecimento, foi feito um banho de gelo com o Erlenmeyer de 30 minutos. Ao final deste tempo, inicia-se o processo de filtragem, que é similar ao da extração de lignina. Quando o medidor atingir o pH neutro, deve ser feito um enxágue com 10 mL de acetona e um outro seguido de água destilada. O funil, junto ao material, deve ser colocado na estufa programada a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  e seco por 18 horas. Findo este período, o conjunto funil + holocelulose é colocado no dessecador por 30 minutos e, após a baixa de temperatura, iniciou-se a pesagem na balança analítica. Os cálculos para obtenção do teor de holocelulose seguem:

$$\frac{MFH - MF}{MA} \times 100\% = TH\% \quad (3.7)$$

Onde,

- MFH - Massa do funil + massa da holocelulose.
- MF - Massa do funil seco.

- MA - Massa da amostra.
- TH% - Teor de holocelulose.

Para a correção dos dados utilizando a umidade, se fez necessário o cálculo da equação 3.8:

$$\frac{TH\%[100 - (TE\% + TU\%)]}{100} = TH\%_{corrigido} \quad (3.8)$$

Onde,

- TH% - Teor de holocelulose.
- TE% - Teor de extrativos.
- TU% - Teor de umidade.
- TH%<sub>corrigido</sub> - Teor de holocelulose corrigido.

#### 3.3.1.6 Teor de alfacelulose

A alfacelulose, segundo TAPPI (2009), é definida como a celulose não degradada. Inicialmente, foi utilizado um funil de vidro sinterizado, seco por 2 horas na estufa programada a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ , de 50 mL e com poros de  $40 \mu$  a  $100\mu$ . Sabendo a massa do funil, este deve ser colocado num kitassato de 1000 mL.

Neste período, 1,0000 g de holocelulose já seca foi colocada num almofariz junto a 15 mL de solução de NaOH a 17,5%. Esperar 2 minutos e, findo este tempo, iniciar a trituração do material por 8 minutos. Por fim, foram adicionados 40 mL de água destilada no almofariz e se transfere todo este conteúdo para o funil. A bomba de vácuo é ligada e o processo é interrompido quando o pH da água a ser filtrada for neutro.

O funil foi transferido para a estufa programada a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  e por lá ficou as 18 horas seguintes. Após secagem, foi pesada a massa do funil junto à massa de alfacelulose. O teor de alfacelulose foi calculado a partir da equação 3.9 a seguir:

$$\frac{MFA - MF}{MAH} \times 100\% = TA\% \quad (3.9)$$

Onde,

- MFA - Massa do funil + massa de alfacelulose.
- MF - Massa do funil.
- MAH - Massa da amostra de holocelulose.

- TA% - Teor de alfacelulose.

Para obtenção do teor de alfacelulose corrigido, foi utilizada a equação 3.10 a seguir:

$$\frac{(TH\%corrigido \times TA\%)}{100} = TA\%corrigido \quad (3.10)$$

Onde,

- TH%corrigido - Teor de holocelulose corrigido.
- TA% - Teor de alfacelulose.
- TA%corrigido - Teor de alfacelulose corrigido.

E pela diferença entre os valores destes teores, soube-se o teor corrigido de hemicelulose pela equação 3.11.

$$TH\%corrigido - TA\%corrigido = THeC\%corrigido \quad (3.11)$$

Onde,

- TH%corrigido - Teor de holocelulose corrigido.
- TA% - Teor de alfacelulose corrigido.
- THeC%corrigido - Teor de hemicelulose corrigido.

### 3.3.2 Análise Termogravimétrica - TGA

A análise termogravimétrica (TGA), também realizada na FGA/UnB no Laboratório de Tecnologias em Biomassa, utilizou o equipamento SDT Q 600 da *TA Instruments*, figura 8, com parâmetros definidos de rampa de aquecimento a 10°C /min com patamar de 1000 °C e com combustível de arraste  $N_2$  a 60 ml/min, para avaliar a degradação térmica da amostra. O analisador utilizado tem capacidade de análise simultânea para duas amostras.

O analisador utilizado tem capacidade de análise simultânea para duas amostras, figura 9. O endocarpo triturado foi colocado no cadinho de platina - 10g - que é localizado numa balança de alta precisão no próprio equipamento de análise. Os parâmetros são programados e os dados coletados e repassados para o computador para análise. Um gráfico com curvas TG e DTG é fornecido, assim como tabelas com as temperaturas, perdas de massa e tempo de ensaio.



Figura 8 – SDT Q600 - *TA Instruments*.

Fonte: Da autora, 2020.



Figura 9 – Balança de alta precisão com cadinhos de platina posicionados.

Fonte: Da autora, 2020.

### 3.3.3 Análise de Poder Calorífico Superior do Endocarpo

A análise de PCS foi realizada no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro, localizado no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). A norma seguida para realização dos ensaios foi a NBR 8.633/1984 com adaptação do LPF.

Após a trituração dos endocarpos das macaúbas cedidas pela Embrapa, estes ma-

teriais foram levados para serem classificados em peneiras de ASTM 30 e 100, ou seja, o topo de 30 mesh e fundo de 100 mesh. O material utilizado para peletização foi o material que ficou entre as peneiras ASTM de 30 e 100 no agitador de peneiras eletromagnético Bectel por  $15 \pm 1$  minutos. Após a classificação nas peneiras, foram selecionados 0,8 g de cada acesso, tanto do DF quanto de SP, de tratamento CI, e estes foram levados para a estufa Marconi programada a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24 horas. Após esse período, o material é retirado da estufa e colocado num dessecador por 30 minutos até que se atinja a temperatura ambiente. O material foi peletizado no equipamento *Spec*.

Os acessos do DF e de SP de tratamento CI foram peletizados individualmente em duplicata. Já os acessos de tratamento CA foram peletizados em amostras compostas, cada acesso fornecendo 0,2 g para a composição de um só pelet. A análise foi feita no calorímetro Parr 6400 em duplicata.

### 3.3.4 Pirólise

O processo de carbonização da macaúba foi realizado no LPF utilizando uma retorta com aquecimento elétrico SLFI. O processo contou com registro de temperaturas no software *Pyrolyse* 10L, em tempo real, do forno e do centro do reator. Este software permite a programação de parâmetros como rampas de aquecimento e de resfriamento. Este sistema é apresentado na figura 10.

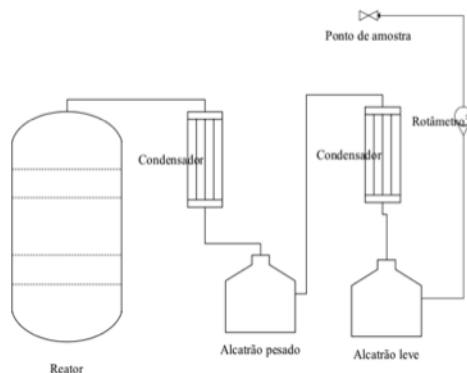


Figura 10 – Esquema da retorta.

Fonte: (LISBOA, 2016)

O sistema da retorta utilizada para carbonização do material é visto na figura 11.

Foram utilizados 630 g de biomassa e colocados no cadinho da retorta, que possui 19 cm de diâmetro e 35 cm de altura e capacidade máxima de 10 litros, como é apresentado na figura 12. A rampa de aquecimento do procedimento foi de  $2^\circ\text{C min}^{-1}$  com patamar de  $430^\circ\text{C}$ , mantida por 420 minutos. Para o resfriamento, este se deu até  $60^\circ\text{C}$ . Os gases foram condensados e o alcatrão pôde ser recolhido no tambor.



Figura 11 – Sistema de retorta localizado no LPF.



Figura 12 – Vedação da retorta com pasta de cobre e fechamento do equipamento.

Ao final, os carvões foram pesados em balança analítica de alta precisão Marte A5000. O rendimento do carvão foi calculado pela relação entre o valor da massa obtida do carvão pela massa da biomassa seca colocada na retorta.

### 3.3.5 Análise Imediata do Carvão

A Análise Imediata do Carvão Vegetal ABNT NBR 8112 e E871 foi realizada no LPF com o material obtido na pirólise. O carvão da macaúba foi logo em seguida triturado no triturador *Ika Werke M20* e classificado em peneiras ASTM com topo de 60 (abertura de 0,250mm) e fundo de ASTM 100 (abertura de 0,150mm) com o auxílio do agitador Bectel por  $15 \pm 1$  minutos. O material retido na peneira ASTM 100 foi utilizado na análise de voláteis e carbono fixo e o material que final ao fundo da peneira foi utilizado para a análise de teor de cinzas. Todas as análises da Análise Imediata do Carvão Vegetal ocorreram em triplicata.

### 3.3.5.1 Umidade

A secagem das amostras de carvão da macaúba foi feita em triplicata. Foi utilizado 1 g de material classificado nas peneiras ASTM 60 seco em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  por 12 horas. Quando retiradas as amostras, estas foram relocadas em dessecador. O cálculo para determinação do teor de umidade é dado pela equação 3.12.

$$\frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 = TU\% \quad (3.12)$$

Onde,

- $m_0$  - Massa inicial.
- $m_1$  - Massa final.
- $TU\%$  - Teor de umidade.

### 3.3.5.2 Teor de voláteis

O teor de voláteis foi determinado utilizando 3 cadinhos e mufla *Quimis Q318A24*. Foi utilizado 1 g de amostra em cada cadinho e, quando a mufla atingiu temperatura constante de  $900^\circ\text{C}$ , os cadinhos foram colocados na tampa por 3 minutos e dentro da mufla por 7 minutos, totalizando 10 minutos.

O teor de voláteis é, então, obtido utilizando a equação 3.13 a seguir.

$$\frac{M_{\text{cadinho} + \text{amostra}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{cadinho} + \text{amostra}}} \times 100 = TV\% \quad (3.13)$$

Onde,

- $M_{\text{cadinho} + \text{amostra}}$  - Massa do cadinho + massa da amostra.
- $M_{\text{final}}$  - Massa final do cadinho + amostra.
- $TV\%$  - Teor de voláteis.

### 3.3.5.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi realizado em triplicata. Foram utilizados 3 cadinhos com 1 g de amostra em cada e colocados na mufla pré-aquecida a  $700^\circ\text{C}$  por 5 horas. Findo este período, os cadinhos foram colocados no dessecador e, a partir daí, pôde-se calcular o teor de cinzas pela equação 3.14.

$$\frac{M_{\text{cadinho} + \text{resíduo}} - M_{\text{cadinho}}}{M_{\text{cadinho} + \text{resíduo}}} \times 100 = TC\% \quad (3.14)$$

Onde,



- $M_{\text{cadinho}} + \text{resíduo}$  - Massa do cadinho + massa do resíduo.
- $M_{\text{cadinho}}$  - Massa do cadinho.
- $TC\%$  - Teor de cinzas.

#### 3.3.5.4 Carbono fixo

O carbono fixo foi obtido a partir do cálculo da diferença entre a quantidade de carbono inicial da amostra e do que restou das cinzas.

$$100 - (TC + MV) = TCF\% \quad (3.15)$$

Onde,

- $TV\%$  - Teor de voláteis.
- $TC\%$  - Teor de cinzas.
- $TCF\%$  - Teor de carbono fixo.



## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Análise Lignocelulósica

A análise lignocelulósica permite avaliar os teores de materiais lignocelulósicos de materiais vegetais, como teores de lignina, holocelulose, extrativos. Estes materiais são renováveis, e por muitas vezes não utilizados. São materiais que permitem extrair compostos e combustíveis, gomas vegetais, estabilizantes, emulsificantes, entre outros.

Os resultados da análise lignocelulósica do endocarpo da macaúba, apresentados na tabela 6 foram coerentes com a literatura revisada. Segundo [Melo et al. \(2015\)](#), o teor de lignina insolúvel do endocarpo da macaúba apresenta um percentual de 40,47%, enquanto que os valores do presente trabalho apresentam 32,75%. Este percentual é próximo ao teor de lignina para a macaúba por [Lisboa \(2016\)](#), com valores de 36,6%. [Rocha \(2018\)](#) apresenta o teor de 27,90% para o endocarpo de babaçu. O baixo teor de umidade deve-se pela própria característica não higroscópica do endocarpo. Os valores de extrativos para a madeira de eucalipto, 6,4%, e endocarpo do babaçu, 7,8%, foram baixos se comparados com os valores do endocarpo da macaúba.

Tabela 6 – Dados da Análise lignocelulósica do endocarpo da macaúba. \*Média dos dados.

Análise Lignocelulósica do Endocarpo da macaúba	
Umidade	2,4075*
Teor de cinzas	1,1389*
Teor de extrativos	14,498*
Teor de lignina insolúvel	32,755*
Holocelulose	47,609*

Fonte: Do autor, 2020.

### 4.2 Análise Termogravimétrica - TGA

A análise termogravimétrica visa submeter uma amostra a um processo dinâmico de aumento de temperatura a observar o decaimento de massa da amostra, ou seja, a sua degradação em função da temperatura. A partir destes dados é possível avaliar a estabilidade térmica da amostra a saber a temperatura na qual é possível fazer aplicações diversas.

A análise foi feita no equipamento SDT Q600 da *TA Instruments*, proporcionando a medição instantânea da variação de massa (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os parâmetros definidos foram uma rampa de aquecimento de 10°C por minuto,

da temperatura ambiente a 1000 °C, utilizando aproximadamente 10g de endocarpo triturado.

A partir dos resultados das curvas de TG e DTG na figura 13, é possível observar duas regiões de degradação térmica, sendo o primeiro entre a temperatura ambiente até os 90°C com pico aos 45°C, o segundo próximo aos 260 a 390°C, com pico aos 350°C. O último pico da DTG ocorreu a 380°C, sugerindo que, para que ocorra a total degradação térmica do material, é necessário usar temperaturas acima desta. Dessa forma, a celulose, lignina e hemicelulose poderão ser completamente degradadas.

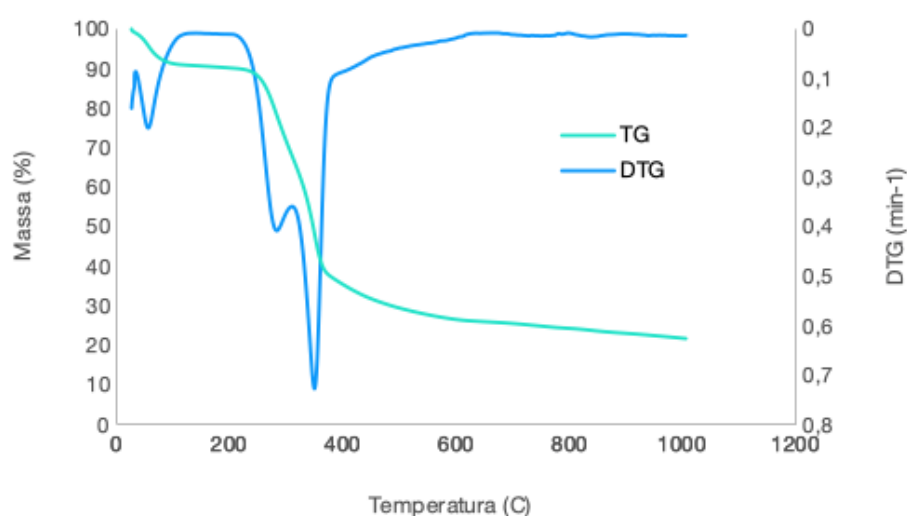


Figura 13 – Curvas DTG e TG para degradação do endocarpo da macaúba.

Fonte: Do autor, 2020.

Os dados de estabilidade térmica ( $T_i$ ), temperatura de início do estágio de degradação ( $T_{on\ set}$ ), temperatura de fim do estágio de degradação ( $T_{end\ set}$ ) e temperatura onde a velocidade de degradação é máxima ( $T_{pico}$ ) estão na tabela 7.

Tabela 7 – Temperaturas de degradação da curva DTG.

Análise Termogravimétrica (TGA)	
$T_i$	40°C
$T_{on\ set\ 1}$	45°C
$T_{end\ set\ 2}$	90°C
$T_{on\ set\ 1}$	260°C
$T_{end\ set\ 2}$	390°C
$T_{pico}$	350°C

Fonte: Do autor, 2020.

Segundo Lisboa (2016), a temperatura na qual ocorre a degradação dos componentes da macaúba (celulose, lignina e hemicelulose) está na faixa dos 325,6°C. O valor

da análise do presente trabalho para o endocarpo da macaúba foi de 380 °C. Comparando os dados com a casca do cupuaçu, 288,9°C, e tucumã, 328,7°C, é possível analisar que o teor de lignina influencia na demanda de temperatura para sua degradação, sendo que o valor de lignina da casca do cupuaçu é de 10,4% e do tucumã de 37,1%.

### 4.3 Análise de Poder Calorífico Superior do Endocarpo

Os dados de PCS foram calculados primeiramente para as amostras CI e posteriormente CA. A tabela 8 apresenta os dados referentes às análises de PCS dos endocarpos da macaúba CI. Inicialmente foi feita a análise individual de cada parcela das regiões do DF e SP a fim de avaliar as diferenças de dados entre cada parcela e região. Contudo, é possível avaliar que a média dos valores dos endocarpos do DF e SP- CI foram muito próximas. Dessa forma, pelo processo demandar tempo e custo, para a análise de PCS dos frutos CA, foram feitas amostras compostas das duas regiões e realizados quatro ensaios.

Tabela 8 – Dados referentes ao PCS do endocarpo da macaúba com diferentes tratamentos: CI e CA.

Poder Calorífico Superior (PCS)		
CI		
DF	1 [MJ/kg]	2 [MJ/kg]
329	21,0221	21,0642
321	21,0798	21,0312
333	21,0290	21,0353
327	21,0699	20,9995
Média		21,0413
SP	1[MJ/kg]	2[MJ/kg]
335	20,9764	20,9535
323	20,9235	20,9087
325	20,8815	20,8659
331	21,0433	20,9744
Média		20,9409
CA		
	1 [MJ/kg]	2 [MJ/kg]
DF	20,9490	20,8996
Média		20,9243
SP	20,8947	21,0312
Média		20,8657

Fonte: Do autor, 2020.

O Poder Calorífico Superior determina a quantificação de energia por unidade de massa num determinado combustível. Desta forma, é o primeiro passo para avaliar um sistema de potência por gaseificação.

Os valores de PCS do endocarpo da macaúba foram coerentes com a literatura. O endocarpo da macaúba, segundo [Evaristo et al. \(2016a\)](#), foi de 5011 Kcal/kg, ou 20,9800 MJ/kg. Não foram verificadas diferenças significativas entre as médias de PCS dos quatro tratamentos.

## 4.4 Pirólise e Análise Imediata do Carvão - ABNT NBR 8112

A tabela 9 apresenta a média dos resultados da Análise Imediata do Carvão da macaúba. Os parâmetros de pirólise utilizados no primeiro teste foram de rampa a 2°C por minuto, num patamar superlongo de 430°C por 18 horas.

Tabela 9 – Valor obtidos na Análise Imediata do Carvão e da macaúba in natura.

Análise Imediata do Carvão (NBR 8112)		
	Carvão [%]	In natura
Umidade	29,85	-
Pirólise	30,54	-
Teor de cinzas	5,44*	2,83%
Teor de voláteis	23,18	-
Carbono fixo	74,615	-
PCS	-	23,1244 MJ/kg

Fonte: Do autor, 2020.

É importante observar o valor de PCS do fruto in natura e do endocarpo da macaúba, visto que o óleo da polpa possa ter interferido no valor final do fruto in natura. Avalia-se, também, que os resultados obtidos no Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro evidenciaram altos valores de rendimento de pirólise e carbono fixo, o que caracteriza um resíduo com potencial para fornecer uma maior quantidade de calor para o sistema. Por isso, observa-se que ao compararmos os dados da macaúba com os do caroço de açaí na tabela 10, vê-se resultados satisfatórios de PCS para a macaúba, significando uma maior quantidade de calor liberada na queima do material fazendo com que o processo seja eficiente.

Tabela 10 – Comparativo entre análise imediata da macaúba e caroço do açaí. \*Média ponderada dos PCS's analisados.

Biomassa	TU in natura [%]	TV [%]	TC [%]	Tcf [%]	PCS in natura [MJ/kg]
<sup>1</sup> Caroço de açaí	46,16	79,44	1,10	19,45	19,14
Macaúba	29,85	23,18	5,44	74,61	20,94

Fonte:

([RANGEL, 2014](#))

## 5 Conclusão

A energia é o insumo principal para criação de bens e fornecimento de serviços cujos quais a sociedade tem se utilizado. Isso significa que ela é o denominador comum no desenvolvimento econômico e nos padrões de vida das nações, implicando na importância do diálogo sobre a garantia de segurança energética.

Por fazer parte de todos os setores da vida cotidiana do ser humano, como trabalho, moradia, transporte, a energia se torna o fator limitante a qualquer desenvolvimento econômico. Fato é que a sua demanda, nos últimos cinquenta anos, triplicou e poderá seguir a mesma taxa de crescimento de consumo para as próximas três décadas. No entanto, estes recursos de origem fóssil podem ter seus dias contados. Dessa forma, mesmo sabendo que a conservação destes recursos energéticos ainda seja a melhor alternativa para o futuro, é necessário que haja políticas energéticas e mudanças regulatórias que se relacionem com a descoberta de fontes alternativas de geração. E, nesse contexto, a macaúba se apresenta como uma das potenciais alternativas para geração de energia elétrica a partir de variadas tecnologias de conversão.

Para a avaliação energética do fruto foram feitas visitas à Embrapa Cerrados e Agroenergia. Além disso, foram utilizadas as instalações do LPF e do Laboratório de Tecnologias da Biomassa na Faculdade do Gama/UnB, cujos quais forneceram todo o suporte para a realização da pesquisa.

Os valores de PCS e Carbono Fixo do fruto foram condizentes com a literatura. O PCS das amostras compostas de SP e DF foram próximos, demonstrando que, possivelmente, o tipo de tratamento não vá interferir neste tipo de análise, mas instiga futuras análises de composição química destes endocarpos para diagnósticos mais precisos.

Os teores de lignina do endocarpo da macaúba se apresentaram maiores se comparados com outras biomassas vegetais – madeira de eucalipto e endocarpo do babaçu. O teor de extrativos também foi maior se comparado a estas mesmas duas biomassas, o que é incomum em madeiras. A análise imediata do carvão da macaúba evidenciou o alto teor de carbono fixo da biomassa, o que se alinha com os resultados de teor de lignina obtidos.

As curvas de TG e DTG apresentaram os pontos e as temperaturas de degradação do endocarpo da macaúba. A análise visa simular condições reais de funcionamento de reatores onde essas informações poderão ser importantes para garantir o melhor controle de temperatura e degradação nestes processos de conversão energética.

As análises do carvão e endocarpo da macaúba apresentaram valores expressivos quando avaliados para fins energéticos e comparados com outras biomassas.





## Referências

- RANGEL, Ramsés Nascimento. Citado na página 45.
- ABNT. *Carvão vegetal - Determinação do Poder Calorífico*. [S.l.], 1984. Citado na página 37.
- ABNT. *Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio*. [S.l.], 1986. Citado 4 vezes nas páginas 24, 40, 42 e 43.
- AHMAD, F. et al. Considerations for the design of organic mulch permeable reactive barriers. *Remediation Journal*, 2007. Citado na página 35.
- ALLEN, M. R. et al. Framing and context. *Global warming of*, v. 1, p. 49–91, 2018. Citado na página 23.
- AQUINO, F. de G. et al. Distribuição geográfica das espécies *acrocomia aculeata* (jacq.) lodd. ex mart. e *caryocar brasiliense* cambess. no bioma cerrado1. 2008. Citado na página 24.
- AQUINO, F. de G. et al. Distribuição geográfica das espécies *acrocomia aculeata* (jacq.) lodd. ex mart. e *caryocar brasiliense* cambess. no bioma cerrado1. 2008. Citado na página 31.
- ARBEX, M. A. et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, SciELO Brasil, v. 30, n. 2, p. 158–175, 2004. Citado na página 29.
- ASTM. Standard test method for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter. *Annu. Book ASTM Stand.; (United States)*, v. 26, 1 1975. Citado na página 43.
- BELLOTE, A. F. J. et al. Biomassa e sua participação na matriz energética brasileira. *Embrapa Territorial-Capítulo em livro científico (ALICE)*, In: KUNZ, A.; OTENIO, MH; LEITAO, RC; GAMBETTA, R.(Ed.). *Energia limpa e ...*, 2018. Citado na página 29.
- BHERING, L. Macaúba: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel. Portal do Agronegócio., 2009. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2005. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/l11097.html](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11097.html)>. Citado na página 29.
- BRASIL. Decreto nº 10.221, de 5 de fevereiro de 2020. institui o programa nacional de universalização do acesso e uso da energia elétrica na amazônia legal - mais luz para a amazônia. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10221.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10221.htm)>. Citado na página 23.

- BRASIL. Lei nº13.576, de 26 de fevereiro de 2017. dispõe sobre a política nacional de biocombustíveis (renovabio) e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm)>. Citado na página 25.
- BRASIL, M. *O fruto da macaúba*. 2018. Disponível em: <<https://blog.macaubabrasil.com.br/o-fruto-da-macauba/>>. Citado na página 32.
- BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE, S. A. A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies. *Biomass Pyrolysis Liquids. Upgrading and Utilisation.*, 1991. Citado na página 39.
- BROWN, A.; FEUVRE, P. L. Technology roadmap: Delivering sustainable bioenergy. *International Energy Agency (IEA): Paris, France*, p. 94, 2017. Citado na página 31.
- BROWN, M. Introduction to thermal analysis. *Kluwer Academic Publishers*, USA, 2001. Citado na página 38.
- CARDOSO, A. N. et al. Extrativismo da macaúba na região do cariri cearense: comercialização e oportunidades. *Embrapa Agroenergia-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 5 pp 25261-25279, 2020., 2020. Citado na página 26.
- CARVALHO, K. J.; SOUZA, A.; MACHADO, C. Ecologia, manejo, silvicultura e tecnologia da macaúba. *Convênio de Cooperação Técnica SECTES/FAPEMIG, Pólo de Excelência em Florestas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa*, 2011. Citado na página 31.
- CETEC. Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais: estudo das oleaginosas nativas de minas gerais. Belo Horizonte, MG, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- CORTEZ, L. Sistemas energéticos–tecnologias de conversão energética da biomassa. *EDUA/EFEI, Manaus, Brazil*, 1997. Citado na página 30.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. *Biomassa para energia*. [S.l.], 2008. Citado 7 vezes nas páginas 29, 31, 32, 33, 34, 35 e 37.
- COSTA, L. V.; OLIVEIRA, E.; PIRES, N. R. O. Biodiesel: Mamona e dendê como culturas energéticas. *Revista Eletrônica de Energia*, v. 5, n. 2, p. 90–99, 2015. Citado na página 33.
- DURÃES, F. O. M. Potenciais e oportunidades para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva para a macaúba. 2008. Citado na página 31.
- EPE. Balanço energético nacional 2020: Ano base 2019. Rio de Janeiro, 2020. Citado na página 24.
- EVARISTO, A. B. et al. Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, Universidade Federal de Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 571–577, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 60.

- EVARISTO, A. B. et al. Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, 2016. ISSN 0103-9954. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53446151020>>. Citado na página 33.
- FARIA, L. Hidrólise do óleo da amêndoa da macaúba com lipase extracelular de *colletotrichum gloesporioides* produzidas por fermentação em substrato líquido. Minas Gerais, 2010. Citado na página 32.
- FERREIRA, V. S. Pré-tratamento para a biomassa lignocelulósica utilizando processos fotocatalíticos. 2019. Citado na página 34.
- FILHO, J. A.; COLOMBO, C.; BERTON, L. Macaúba: palmeira nativa como opção bioenergética. *Pesqui Tecnol*, v. 9, p. 1–10, 2012. Citado na página 31.
- GOUVÊA, A. R. *Uma visão estratégica do setor de distribuição de energia elétrica frente aos desafios da expansão de recursos energéticos distribuídos no Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019. Citado na página 23.
- GRANDE, C.; SUL, M. G. do. Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas cerrado e pantanal do estado de mato grosso do sul, brasil. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- HATAKEYAMA, T.; QUINN, F. X. Thermal analysis: fundamentals and applications to polymer science. 1999. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- HATFIELD, R.; FUKUSHIMA, R. S. Can lignin be accurately measured? *Crop Science.*, 2005. Citado na página 35.
- HAYKIRI-AÇMA, H. Combustion characteristics of different biomass materials. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 155–162, 2003. Citado na página 33.
- HUBBE, M. A. et al. Cellulosic nanocomposites: a review. *Bioresources*, 2008. Citado na página 36.
- IEA. Energy global: Co2 status report. *IEA (International Energy Agency): Paris, France*, 2019. Citado na página 23.
- IEA. *Energy Technology Perspectives*. Paris: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>>. Citado na página 23.
- IEA. Sdg7:data and projections. Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections>>. Citado na página 23.
- INTERATIVA, Q. N. Ciclo do carbono. Química nova interativa, 2019. Citado na página 29.
- IRENA. *Bioenergy*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/bioenergy>>. Citado na página 30.
- IRENA. *Circular Carbon Economy Report 05. Recycle:Bioenergy*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Recycle-Bioenergy>>. Citado na página 30.

- (IRENA), I. R. E. A. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). Abu Dhabi, 2019. Citado na página 31.
- JENKINS, B. Fuel properties for biomass materials. international symposium on application and management of energy in agriculture: The role of biomass fuels. Delhi, 1990. Citado na página 37.
- JR., N. P.; COUTO, M.; ANNA, L. S. Biomass of lignocellulosic composition for fuel ethanol production and the context of biorefinery. *Series on Biotechnology*, Rio de Janeiro, RJ, 2008. Citado na página 36.
- KAMM, B.; KAMM, M. Principles of biorefineries. *Applied Microbiological Biotechnology*, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- LI, J.; YUAN, H.; YANG, J. Bacteria and lignin degradation. *Frontiers of Biology in China*, 2009. Citado na página 35.
- LISBOA, F. C. d. Carbonização e gaseificação de resíduos da macaúba, tucumã e cupuaçu para geração de eletricidade. 2016. Citado 9 vezes nas páginas 29, 31, 33, 35, 37, 39, 52, 57 e 58.
- LORENZI, G. *Acrocomia aculeata* (jacq.) lodd. ex mart. arecaceae: bases para o extrativismo sustentável. Curitiba, PR, 2006. Citado na página 24.
- LOSEKANN, L.; TAVARES, F. B. *Política Energética no BRICS: desafios da transição energética*. [S.l.], 2019. Citado na página 25.
- MACDONALD, S.; EYRE, N. An international review of markets for voluntary green electricity tariffs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 91, p. 180–192, 2018. Citado na página 24.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002. Citado na página 33.
- MELO, P. G. d. et al. Estudo das propriedades físico-químicas de membranas de acetato de celulose/glicerol incorporadas com aditivos de lignina extraída do endocarpo da macaúba (*acrocomia aculeata*) e seus derivados modificados quimicamente. Universidade Federal de Uberlândia, 2015. Citado na página 57.
- MIYAUCHI, T.; MORI, M.; ITO, K. Quantitative determination of benzal- konium chloride in treated wood by solid-phase extraction followed by liquid chromatography with ultraviolet detection. *Journal of Chromatography A*, 2005. Citado na página 45.
- MORAIS, J. P. S. *Procedimentos para análise lignocelulósica*. Campina Grande, PB, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 43 e 45.
- MORCOTE-RIOS, G.; BERNAL, R. Remains of palms (palmae) at archaeological sites in the new world: a review. *The botanical review*, Springer, v. 67, n. 3, p. 309–350, 2001. Citado na página 31.
- MOURA, E. F. et al. Embriogênese somática em macaúba: indução, regeneração e caracterização anatômica. Universidade Federal de Viçosa, 2007. Citado na página 33.

- MURDOCK, H. E. et al. Renewables 2019 global status report. 2019. Citado na página 23.
- NEGRETTE, R. R. D. et al. Potencial produtivo e rendimento do óleo de um grupo de culturas oleaginosas em uruguaiana-rs. *Current Agricultural Science and Technology*, v. 17, n. 2, 2011. Citado na página 33.
- NOGUEIRA, M.; RENDEIRO, G. *Caracterização Energética da Biomassa Vegetal - Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia*. [S.l.], 2008. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 37.
- NUCCI, S. M. *Desenvolvimento, caracterização e análise da utilidade de marcadores microssatélites em genética de população de macaúba*. 84 f. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Campinas ..., 2011. Citado na página 32.
- PINO, V. et al. Determination of the alkyl- and methoxy-phenolic content in wood extractives by micellar solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta*, 2007. Citado na página 45.
- PÉREZ, J. et al. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemi-cellulose and lignin: an overview. *International Microbiology*, 2002. Citado na página 35.
- QUIRINO, W. *Utilização Energética de Resíduos Vegetais*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>>. Citado na página 37.
- RANGEL, R. N. Modelagem, caracterização e simulação da pirólise do caroço de açaí. 2014. Citado na página 60.
- RAO, Y.; XIANG, B. Determination of total ash and acid-insoluble ash of chinese herbal medicine *prunellae spica* by infrared spectroscopy. *Yakugaku Zasshi*, 2009. Citado na página 45.
- RATTER, J.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. Analysis of the florestic composition of the brazilian cerrado vegetation iii: comparison of the woody vegetation of 376 areas. *Edinburgh Journal of Botany* 60 (1), 2003. Citado na página 32.
- RAUSCHMAYER, H. Contribuições da experiência alemã para a regulamentação da geração distribuída no brasil. *Deutsch-Brasilianische Industrie- und Handelskammer*, 2018. Disponível em: <<https://www.solarize.com.br>>. Citado na página 30.
- REN21. Renewable 2018 global status report. 2018. Disponível em: <[https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/](https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/)>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- ROCHA, P. H. d. Q. Caracterização e análise dos endocarpos de buriti (*mauritia flexuosa*) e babaçu (*attalea speciosa*) para fins energéticos. 2018. Citado na página 57.
- SILVA, I. C. C. D. S. *Uso de processos combinados para aumento do rendimento da extração e da qualidade do óleo de macaúba*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 31.
- SILVÉRIO, F. O. et al. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. *Revista Árvore*, 2006. Citado na página 45.

- SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. A.; RASSINI, J. B. Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico. São Carlos, 2002. Citado na página 44.
- TAHERZADEH, M. J.; KARIMI, K. Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *Bioresource*, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- TAPPI. T 204 cm-97. solvent extractives of wood and pulp. 1997. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- TAPPI. T 211 om-02. ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. 2002. Citado na página 45.
- TAPPI. T 222 om-02. acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002. Citado na página 47.
- TAPPI. T 421 om-02. moisture in pulp, paper and paperboard. 2002. Citado na página 44.
- TAPPI. T 203 cm-99. alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 49.
- TAVARES, F. B. Política energética em um contexto de transição: A construção de um regime de baixo carbono. 2019. Citado na página 25.
- TAYLOR, A. M. et al. Radial patterns of carbon isotopes in the xylem extractives and cellulose of douglas-fir. *Tree Physiology*, 2007. Citado na página 46.
- THIEX, N. Committee on feeds, fertilizers, and related topics. *Journal of AOAC International*, 2002. Citado na página 44.
- VENANCIO, M. et al. Teor de óleo e perfil de ácidos graxos durante o desenvolvimento de frutos de macaúba. UFLA, 2016. Citado na página 31.
- VIEIRA, A. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascável, 2012. Citado na página 33.
- WERTHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. *Progress in energy and combustion science*, Elsevier, v. 26, n. 1, p. 1–27, 2000. Citado na página 33.
- ZHANG, X. et al. Degradation of wood extractives in thermo-mechanical pulp by soybean lipoxygenase. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007. Citado na página 45.

## Apêndices





# APÊNDICE A – Primeiro Apêndice

Ficha para coleta de frutos nas redondezas do Ulysses Guimarães para rastreabilidade de frutos.

COLETA DE MACAÚBA FICHA DE CAMPO	
1) Responsável pelas informações	
2) Data	
3) Local	
<b>Observações sobre a palmeira</b>	
Localização da palmeira	
Altura total	
Altura de inserção dos cachos	
Diâmetro (DAP)	Medir a circunferência à 1,30 m de altura do solo com uma fita métrica (medida de circunferência), lembrando que Circunferência é $= \pi \times D$ .
Descrição do caule	
Quantidade de cachos no pé	
Quantidade estimada de frutos por cacho	
Cachos com inflorescência ou só fruto	
Quantidade de fruto coletado	
Descrição do fruto	
Estado fitossanitário	Descrição do "estado de saúde" da planta. Se há presença de broca no caule, algum tipo de dano mecânico. Se as folhas estão com aparência saudável, se aparentam ter sido comidas por lagartas.
Diâmetro médio dos frutos coletados	Pode ser com um paquímetro, para ter idéia se os frutos são pequenos ou grandes. Medir uns 20 frutos e tirar a média. Tirar foto dos frutos com uma régua perto para referencia.
Cor da polpa	Usar foto e descrever (amarelo claro, etc)
Sabor da polpa	Adocicado/ amargo

As observações, informações e orientações para o operador podem ficar aqui no rodapé do quadro.

Figura 14 – *Ficha de coleta e rastreabilidade de frutos nas redondezas do Ulysses Guimarães- frente.*

**OBSERVAÇÕES**

- Os frutos devem ser coletados no chão, próximo à palmeira e só devem ser coletados os frutos com boa aparência. Em dúvida, tire a casca e verifique a polpa, se estiver cinza ou enegrecida evitar a coleta.
- Verifique o cálice residual sobre o fruto, se estiver verde ou verde amarelado é sinal que o fruto é fresco.
- Os frutos devem ser acondicionados em sacos plásticos com uma identificação permanente. É preciso relacionar os frutos colhidos com a palmeira de onde foram retirados. É preciso saber a origem das amostras em qualquer análise de laboratório.



Figura 1- Frutos frescos. Foto: Vitória Ferrari, 2014.

- <sup>1</sup> Apenas uma pessoa é responsável pela ficha de campo. Deve haver um observador e um anotador. O observador e o anotador devem ser preferencialmente os mesmos.
  - <sup>2</sup> Anotar longitude e latitude via GPS. Caso não se tenha acesso ao mesmo, é importante anotar pontos de referência que identifiquem a qual pé pertencem as amostras.
  - <sup>3</sup> Utilize fita métrica para medir o comprimento da sua sombra do seu pé até a ponta da mesma. Em seguida meça o comprimento da sombra da árvore. Sabendo disso:  
Altura da árvore: (sua altura x sombra da árvore)/sua sombra.
  - <sup>4</sup> Mesmo procedimento do tópico anterior.
  - <sup>5</sup> O operador deve medir em seu corpo, a partir dos pés, que altura dá 1,30 m do solo. Uma vez conhecida esta altura ele se aproxima da árvore e sempre coloca a fita métrica no entorno do tronco para medir a circunferência nesta altura do solo.
  - <sup>6</sup> Verificar presença de espinho. Plantas mais velhas possuem espinhos no alto, geralmente na base das folhas. Se tiver espinhos, ou não, deve ser anotado na ficha.
  - <sup>7</sup> Descrição do “estado de saúde” da planta. Se há presença de broca no caule, algum tipo de dano mecânico. Se as folhas estão com aparência saudável, se aparentam ter sido comidas por lagartas.
- Essa medição pode ser feita com um paquímetro, para ter ideia se os frutos são pequenos ou grandes. Medir uns 20 frutos e tirar a média. Tirar foto dos frutos com uma régua perto para referência.

Figura 15 – *Ficha de coleta e rastreabilidade de frutos nas redondezas do Ulysses Guimarães- verso.*